



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENENTUAN LOKASI DAN NILAI OPTIMAL KAPASITOR
UNTUK MENGURANGI KERUGIAN DAYA MENGGUNAKAN
KOMBINASI *POWER LOSS INDEX-LOSS SENSITIVITY* DAN
DIRECT SEARCH**

Irfan Efrizal Rahman
NRP 2213105060

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT AND SIZING FOR
POWER LOSS REDUCTION USING COMBINED POWER
LOSS INDEX-LOSS SENSITIVITY AND DIRECT SEARCH**

Irfan Efrizal Rahman
NRP 2213105060

Supervisors

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2015

**PENENTUAN LOKASI DAN NILAI OPTIMAL KAPASITOR
UNTUK MENGURANGI KERUGIAN DAYA MENGGUNAKAN
KOMBINASI *POWER LOSS INDEX-LOSS SENSITIVITY* DAN
DIRECT SEARCH**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof.Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
NIP.194907151974121001

Dr.Ir. Soedibyo, M.MT.
NIP.195512071980031004

**SURABAYA
JULI, 2015**

Penentuan Lokasi dan Nilai Optimal Kapasitor untuk Mengurangi Kerugian Daya Menggunakan Kombinasi *Power Loss Index-Loss Sensitivity* dan *Direct Search*

Irfan Efrizal Rahman
2213 105 060

Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

Abstrak:

Jaringan distribusi radial merupakan jaringan distribusi yang cukup banyak digunakan pada daerah berkembang karena lebih mudah dalam penambahan beban. Namun, ada beberapa kendala dalam sistem distribusi radial ini diantaranya rugi daya, *drop* tegangan, power faktor yang kecil khususnya pada jaringan dengan jarak yang jauh dari sumber. Pemasangan kapasitor pada sistem dapat mengkompensasi daya reaktif, menaikkan level tegangan, dan meningkatkan power faktor. Oleh karena itu, pemasangan kapasitor dengan nilai yang tepat dapat menurunkan rugi daya secara signifikan dengan penghematan biaya secara minimum. Metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity* dapat digunakan untuk menentukan letak kapasitor secara optimal dengan memberi indeks pada setiap bus dengan parameter dari hasil *load flow* dan *Direct Search* untuk mencari nilai kapasitor optimal dengan lokasi kapasitor dari metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity*. Aliran daya awal dilakukan untuk mendapat rugi daya awal pada jaringan. Setelah dilakukan analisa *Placement and Sizing* didapatkan penurunan rugi daya sebesar 50.9263 KW dengan 4 lokasi dan 350 KVAR nilai kapasitor.

Kata kunci : Rugi Daya, Kapasitor, *Power Loss Index-Loss Sensitivity*, *Direct Search*

Penentuan Lokasi dan Nilai Optimal Kapasitor untuk Mengurangi Kerugian Daya Menggunakan Kombinasi *Power Loss Index-Loss Sensitivity* dan *Direct Search*

Irfan Efrizal Rahman
2213 105 060

Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

Abstrak:

Jaringan distribusi radial merupakan jaringan distribusi yang cukup banyak digunakan pada daerah berkembang karena lebih mudah dalam penambahan beban. Namun, ada beberapa kendala dalam sistem distribusi radial ini diantaranya rugi daya, *drop* tegangan, power faktor yang kecil khususnya pada jaringan dengan jarak yang jauh dari sumber. Pemasangan kapasitor pada sistem dapat mengkompensasi daya reaktif, menaikkan level tegangan, dan meningkatkan power faktor. Oleh karena itu, pemasangan kapasitor dengan nilai yang tepat dapat menurunkan rugi daya secara signifikan dengan penghematan biaya secara minimum. Metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity* dapat digunakan untuk menentukan letak kapasitor secara optimal dengan memberi indeks pada setiap bus dengan parameter dari hasil *load flow* dan *Direct Search* untuk mencari nilai kapasitor optimal dengan lokasi kapasitor dari metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity*. Aliran daya awal dilakukan untuk mendapat rugi daya awal pada jaringan. Setelah dilakukan analisa *Placement and Sizing* didapatkan penurunan rugi daya sebesar 50.9263 KW dengan 4 lokasi dan 350 KVAR nilai kapasitor.

Kata kunci : Rugi Daya, Kapasitor, *Power Loss Index-Loss Sensitivity*, *Direct Search*



Optimal Capacitor Placement and Sizing for Power Loss Reduction Using Combined Power Loss Index-Loss Sensitivity and Direct Search

Irfan Efrizal Rahman
2213 105 060

Supervisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Supervisor II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

Abstract:

Radial Distribution Network is a network that most of developed country used because it is easy on addition of load. But, there are some problem on this radial system including losses, voltage drop, small power factor especially on the longest bus from the source. Capacitor installment on the system can compensate reactive power, increasing voltage level, and power factor. Therefore, installment of capacitor with the right location and size can reduce losses significant with the minimum cost. Power loss index-loss sensitivity method can be use to place capacitor with optimal by giving index on each bus with parameter from load flow result and Direct Search to find optimal size of capacitor with the location of capacitor from Power Loss Index-Loss Sensitivity. The first load flow use to obtain first losses on the network. After the placement and sizing analyze done, reducement of losses obtain by 50.9263 KW with the 4 location and 350 KVAR of capacitor sizing.

Keywords : Losses, Capacitor, Power Loss Index-Loss Sensitivity, Direct Search.



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, dengan segala puji syukur kepada Allah SWT yang memiliki segala apa yang ada di dunia. Dengan segala kerendahan hati, hanya karena limpahan kasih sayang, karunia, petunjuk, dan bimbingan Allah SWT penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul **“Penentuan Lokasi Dan Nilai Optimal Kapasitor Untuk Mengurangi Kerugian Daya Menggunakan Kombinasi *Power Loss Index-Loss Sensitivity Dan Direct Search*”**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan Strata 1 (S1) pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri-Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT atas limpahan ridho, rahmat dan karunia-Nya dan Nabi Muhammad SAW yang telah banyak memberi syafaat.
2. Bapak dan Ibu Penulis, mas Yuyus, mbak Ani, mas Helmi, dan Dita serta seluruh keluarga yang selalu mendukung dan membantu penulis dalam menyelesaikan studi.
3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, PhD dan Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. sebagai dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan dan perhatiannya dalam penyelesaian Tugas Akhir.
4. Dimas Fajar Uman P., ST., MT. yang banyak memberikan dukungan dan bantuan pada penulis selama penyelesaian Tugas Akhir.
5. Teman-teman seperjuangan Final Project, khususnya Novian Umen, Alfian, Samsu, Oyong, RAR, Antok, Nizar, Khakim, Yaqin, Agung, Aris Teman-teman asisten dan trainee Lab. B103, Serta keluarga besar Power LJ gasal 2013.
6. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS.
7. Dan seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu yang telah banyak membantu penulis.

Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2015

Penulis



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika	3
1.6 Relevansi	4

BAB II SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik	5
2.2 Pengelompokan Jaringan Distribusi	6
2.3 Klasifikasi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik	7
2.4 Jaringan Distribusi Radial Berdasarkan Susunan rangkaianannya	9
2.5 Sistem Tenaga Listrik Tiga Fasa	13
2.6 Analisa Aliran Daya	14
2.7 Metode <i>Forward-Backward Sweep</i>	15
2.8 Kuantitas Per Unit (PU)	17
2.9 Kapasitor Shunt	18

BAB III PERANCANGAN PENEMPATAN DAN NILAI KAPASITOR PADA SISTEM IEEE-33 BUS

3.1 Pengumpulan Data	23
3.2 Analisa Aliran Daya <i>forward-backward Sweep</i>	23
3.3 <i>Power loss Index – Loss Sensitivity</i>	27
3.3.1 <i>Power loss Index</i>	28
3.3.2 <i>Loss Sensitivity</i>	29
3.4 <i>Direct Search Algorithm</i>	30

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Sistem Distribusi IEEE-33 Bus	35
4.2	Analisis Aliran Daya IEEE-33 Bus	35
4.3	Hasil Nilai <i>Power loss Index-Loss sensitivity</i> Pada Sistem IEEE-33 Bus	40
4.3.1	Hasil <i>Power loss index</i>	40
4.3.2	Hasil <i>Loss sensitivity</i>	43
4.3.3	Hasil penentuan lokasi 6 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	45
4.3.4	Hasil penentuan lokasi 5 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	45
4.3.5	Hasil penentuan lokasi 4 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	46
4.3.6	Hasil penentuan lokasi 3 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	46
4.3.7	Hasil penentuan lokasi 2 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	46
4.3.8	Hasil penentuan lokasi 1 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	46
4.4	Hasil <i>Direct Search Algorithm</i>	47
4.4.1	Pemasangan 6 kapasitor	47
4.4.2	Pemasangan 5 kapasitor	50
4.4.3	Pemasangan 4 kapasitor	53
4.4.4	Pemasangan 3 kapasitor	56
4.4.5	Pemasangan 2 kapasitor	59
4.4.6	Pemasangan 1 kapasitor	62
4.5	Analisa sistem keseluruhan	65

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	67
5.2	Saran	68

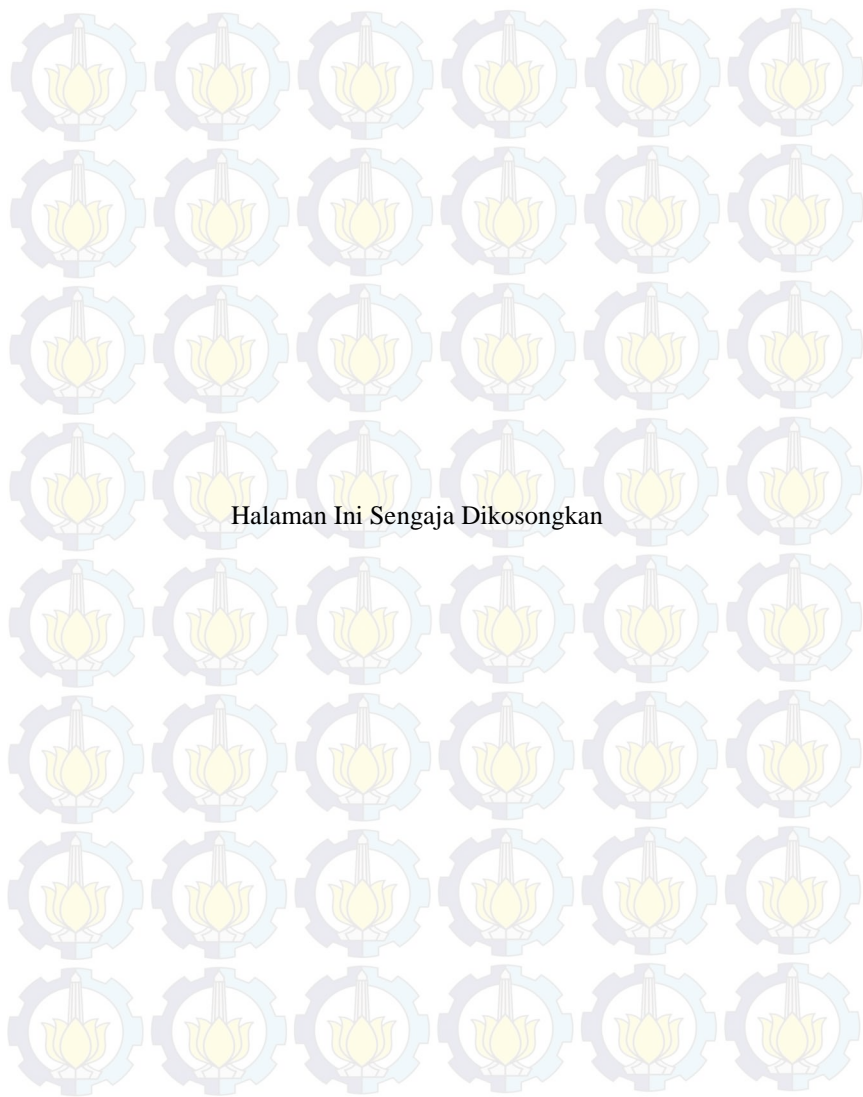
DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIOGRAFI PENULIS

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Keuntungan pemasangan kapasitor	20
Tabel 4.1 Hasil analisa aliran daya sistem IEEE-33 Bus	36
Tabel 4.2 Hasil <i>Power loss index</i> pada IEEE-33 Bus	41
Tabel 4.3 Hasil <i>Loss sensitivity</i> pada IEEE-33 Bus	43
Tabel 4.4 Hasil 6 bus potensial dengan metode <i>Power loss index- Loss sensitivity</i>	45
Tabel 4.5 Daftar Nilai kapasitor.....	47
Tabel 4.6 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 6 kapasitor	47
Tabel 4.7 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 5 kapasitor	50
Tabel 4.8 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 4 kapasitor	53
Tabel 4.9 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 3 kapasitor	56
Tabel 4.10 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 2 kapasitor	59
Tabel 4.11 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 1 kapasitor	62
Tabel 4.6 Hasil F dan rugi pada sistem pada setiap kasus.....	65



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Single line diagram</i> Sistem tenaga listrik	7
Gambar 2.2 Penyaluran daya listrik	8
Gambar 2.3 Jaringan Distribusi radial tipe pohon	10
Gambar 2.4 Jaringan Distribusi radial tipe tie dan switch	11
Gambar 2.5 Jaringan Distribusi radial tipe pusat beban	12
Gambar 2.6 Jaringan Distribusi radial dengan phase area	13
Gambar 2.7 Skema sistem tenaga listrik	13
Gambar 2.8 <i>Linear Network</i>	15
Gambar 2.9 <i>Non Linear Network</i>	16
Gambar 2.10 Pemasangan Kapasitor pada sistem	19
Gambar 2.11 Lokasi pemasangan kapasitor pada sistem tenaga listrik	20
Gambar 3.1 Blok diagram Sistem	21
Gambar 3.2 <i>Flowchart</i> Sistem	22
Gambar 3.3 <i>Flowchart load flow</i>	24
Gambar 3.4 <i>Single Line diagram</i> contoh analisis menggunakan Metode K-matrik	25
Gambar 3.5 Jaringan dua bus	28
Gambar 3.6 Jaringan distribusi dua bus	29
Gambar 3.7 <i>Flowchart Direct Search algorithm</i>	32
Gambar 4.1 Rugi daya awal sistem	40
Gambar 4.2 Grafik <i>Power loss index</i> pada IEEE-33 Bus.....	42
Gambar 4.3 Grafik <i>Loss sensitivity</i> pada IEEE-33 Bus.....	44
Gambar 4.4 Hubungan fungsi objektif dan nilai 6 kapasitor.....	49
Gambar 4.5 Hubungan rugi daya dan nilai 6 kapasitor	49
Gambar 4.6 Hubungan fungsi objektif dan nilai 5 kapasitor.....	52
Gambar 4.7 Hubungan rugi daya dan nilai 5 kapasitor	52
Gambar 4.8 Hubungan fungsi objektif dan nilai 4 kapasitor.....	55
Gambar 4.9 Hubungan rugi daya dan nilai 4 kapasitor	55
Gambar 4.10 Hubungan fungsi objektif dan nilai 3 kapasitor.....	58
Gambar 4.11 Hubungan rugi daya dan nilai 3 kapasitor	58
Gambar 4.12 Hubungan fungsi objektif dan nilai 2 kapasitor.....	61
Gambar 4.13 Hubungan rugi daya dan nilai 2 kapasitor	61
Gambar 4.14 Hubungan fungsi objektif dan nilai 1 kapasitor.....	64
Gambar 4.15 Hubungan rugi daya dan nilai 1 kapasitor	64



BIOGRAFI PENULIS



Irfan Efrizal Rahman atau biasa dipanggil Irfan lahir di Surabaya pada tanggal 11 Oktober 1991. Penulis menempuh Sekolah dasar di SD Muhammadiyah 4 Surabaya selama 6 tahun, kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 6 di Surabaya selama 3 tahun, serta menempuh pendidikan di SMA Muhammadiyah 2 Surabaya selama 3 tahun. Setelah lulus dari SMA, penulis melanjutkan kuliah Program Diploma 3 jurusan Teknik Elektronika di PENS-ITS Surabaya. Setelah menyelesaikan program Diploma 3, saat ini penulis sedang melanjutkan kuliah Program Strata 1 (S1) jurusan Teknik Elektro di ITS Surabaya. Penulis hobi bermain game dan badminton. Penulis dapat dihubungi melalui email ier.fun@gmail.com

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik adalah sistem distribusi. Sistem distribusi memiliki beberapa tipe sistem, salah satunya adalah sistem distribusi jaringan radial. Sistem distribusi jaringan radial merupakan jaringan distribusi yang cukup banyak digunakan di daerah berkembang sehingga lebih mudah dalam hal penambahan beban. Namun, ada beberapa kendala pada sistem distribusi radial ini diantaranya rugi daya yang cukup besar, power faktor yang kecil, dan nilai tegangan yang buruk, khususnya pada jaringan dengan jarak yang cukup jauh dari sumber. Salah satu cara untuk mengatasi masalah tersebut adalah pemasangan kapasitor pada sistem untuk mengkompensasi daya reaktif, mengurangi rugi daya, menaikkan level tegangan dan koreksi power faktor[1].

Tugas akhir ini dibuat untuk menganalisa kondisi sistem pada jaringan distribusi radial dengan melakukan studi aliran daya (*load flow*) sehingga diketahui besar daya dan tegangan setiap bus pada jaringan distribusi dan juga rugi daya pada jaringan distribusi tersebut. Parameter-parameter pada *load flow* akan digunakan pada metode *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search algorithm* untuk dilakukan penempatan dan juga nilai kapasitor pada jaringan distribusi untuk mengurangi kerugian daya pada sistem distribusi.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah tentang Bagaimana menganalisa lokasi penempatan kapasitor berdasarkan metode *power loss index-loss sensitivity* dan juga Bagaimana menganalisa ukuran/nilai optimal kapasitor berdasarkan metode *direct search algorithm*. Adapun batasan tersebut adalah sebagai berikut :

1. Studi aliran daya yang dilakukan adalah sistem distribusi radial pasif tiga fasa seimbang
2. Metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity* digunakan untuk penentuan letak kapasitor dan *Direct Search* digunakan untuk penentuan nilai optimal kapasitor.

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui bus potensial untuk penempatan kapasitor berdasarkan metode *power loss index-loss sensitivity*.
2. Mengetahui ukuran/nilai kapasitor berdasarkan metode *direct search algorithm*.
3. Mengetahui rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor pada jaringan distribusi.

1.4 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam penelitian dan Tugas Akhir ini adalah :

1. Studi Literatur

Penulis mempelajari mengenai dasar teori studi aliran daya, kapasitor pada distribusi, dan pemograman Matlab dari buku literatur, buku tugas akhir, artikel-artikel dari internet dan jurnal IEEE. Untuk mengetahui metode dan karakteristik sebagai acuan dalam penelitian tugas akhir ini.

2. Pembuatan Program

Dalam pembuatan program yaitu menggunakan software Matlab R2009a untuk analisa aliran daya pada sistem yang diuji dan dilakukan analisa dengan metode *Power loss index-loss sensitivity* dan *direct search algorithm*.

3. Pengujian Program dan Analisa Data

Setelah program simulasi sudah selesai, diharapkan hasil simulasi berupa indeks dan nilai kapasitor. Maka penulis dapat menganalisa penempatan dan nilai optimal kapasitor untuk mengurangi kerugian daya pada jaringan distribusi.

4. Penulisan Laporan Tugas Akhir

Sebagai hasil akhir dari penelitian dilakukan penulisan laporan dalam bentuk buku tugas akhir.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan pembacaan data saluran dan beban

Pembacaan data saluran dan beban dilakukan pada jaringan distribusi radial. Data tersebut digunakan sebagai data awal dalam simulasi sebelum adanya penempatan kapasitor.

2. Menganalisa aliran daya

Dari urutan kerja point 1 diatas, dapat dilakukan analisa aliran daya dengan *software* Matlab untuk mendapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk digunakan dalam analisa penempatan dan nilai kapasitor pada jaringan distribusi.

3. Menentukan *Power loss index-Loss sensitivity*

Dari hasil simulasi aliran daya (point 2) akan didapatkan parameter. Parameter tersebut digunakan untuk menghitung nilai *Power loss index-Loss sensitivity* sehingga didapatkan nilai indeks setiap bus.

4. Menentukan penempatan kapasitor

Berdasarkan nilai indeks (point 3) dapat ditentukan lokasi penempatan kapasitor untuk mengurangi kerugian daya sistem berdasarkan indeks terendah yang menandakan bahwa bus tersebut paling tidak stabil.

5. Menentukan nilai kapasitor dengan *direct search algorithm*

Dari point 4 maka akan dilakukan analisa nilai kapasitor optimal pada jaringan distribusi sehingga didapat fungsi objektif minimum.

6. Kesimpulan

Pada urutan kerja terakhir, dilakukan pengambilan kesimpulan dan rekomendasi dari hasil tugas akhir yang dapat digunakan sebagai referensi untuk tugas akhir berikutnya.

1.6 Sistematika

Sistematika dalam penulisan Tugas Akhir ini terbagi atas lima bagian dengan terurai sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai pendahuluan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.

BAB II : SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Bab ini secara garis besar membahas tentang sistem distribusi tenaga listrik, aliran daya, dan kapasitor pada sistem distribusi.

BAB III : PERENCANAN PENEMPATAN DAN NILAI KAPASITOR PADA SISTEM IEEE 33 BUS

Bab ini berisi tentang rancangan sistem dari sistem distribusi radial dan rancangan program *power loss index-loss sensitivity* serta *direct search*

algorithm untuk penentuan lokasi dan nilai dari kapasitor pada jaringan distribusi.

BAB IV : SIMULASI DAN ANALISA DATA

Pada bab ini berisi tentang hasil dari simulasi program *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search algorithm* untuk penentuan lokasi dan nilai kapasitor, serta pengaruh banyaknya kapasitor dan nilai kapasitor terhadap fungsi objektif pada *direct search algorithm*.

BAB V : PENUTUP

Berisikan tentang kesimpulan dan saran dari pengerjaan proyek akhir.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Menjadi acuan untuk menganalisa penentuan lokasi dan nilai kapasitor pada suatu sistem distribusi.
2. Dapat menjadi acuan untuk pemasangan kapasitor dan nilai kapasitor pada bus dengan indeks terlemah.
3. Dapat menjadi referensi atau tolok ukur untuk penelitian tentang studi *optimal capacitor placement and sizing*.
4. Dapat menjadi referensi dalam pengembangan metode *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search algorithm* yang lebih detail.

BAB II

SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah sebagai pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan) dan merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dengan tegangan 11 kV hingga 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan (*step up transformer*) menjadi 70 kV, 154kV, 220kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan tersebut adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya listrik pada saluran transmisi, dimana rugi-rugi daya listrik pada saluran transmisi adalah sebanding dengan arus kuadrat yang mengalir (I^2R). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan semakin kecil. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan kembali menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan (*step down transformer*) pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380V yang selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen atau industri. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Pada sistem penyaluran daya listrik jarak jauh selalu menggunakan tegangan tinggi hingga tegangan ekstra tinggi dengan menggunakan transformator penaik tegangan (*step up transformer*). Nilai tegangan yang sangat tinggi ini (*HV, UHV, EHV*) menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain berbahaya bagi lingkungan dan mahalnnya harga perlengkapannya. Selain itu nilai tegangan yang dikirim menjadi tidak sama dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban atau sisi

konsumen. Maka pada daerah-daerah pusat beban, tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan transformator penurun tegangan (*step down transformer*). Akibatnya, bila ditinjau dari nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber atau pembangkit hingga di titik beban atau konsumen, terdapat beberapa bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda.

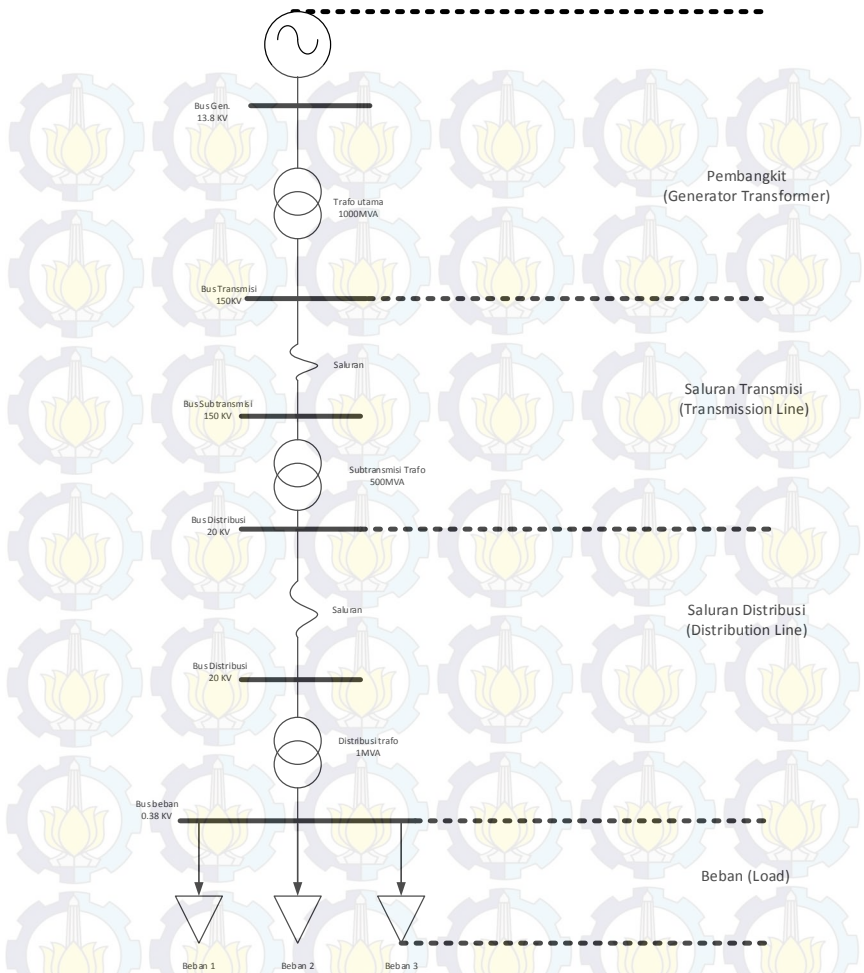
2.2 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Untuk memudahkan dalam penyederhanaan jaringan distribusi tenaga listrik, dilakukan pembagian serta pembatasan daerah sebagai berikut :

- a. Daerah I : Bagian pembangkitan (*Generation*).
- b. Daerah II : Bagian penyaluran (*Transmission*) , bertegangan tinggi (HV,UHV,EHV).
- c. Daerah III : Bagian Distribusi Primer, bertegangan menengah (6 kV hingga 20 kV).
- d. Daerah IV : Instalasi bertegangan rendah 220/380 Volt (Di dalam bangunan pada beban/konsumen).

Berdasarkan pembagian serta pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa Sistem Distribusi adalah Daerah III dan IV yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan dengan beberapa cara sesuai dari segi apa klasifikasi itu dibuat. Dengan demikian ruang lingkup Jaringan Distribusi adalah :

1. SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah)
Terdiri dari tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan kelengkapannya, serta peralatan pengaman dan pemutus.
2. SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah)
Terdiri dari kabel tanah, *indoor* dan *outdoor termination*, batu bata, pasir dan lain-lain.
3. Gardu Transformator
Terdiri dari transformator, tiang, pondasi tiang, rangka tempat trafo, LV (*low voltage*) panel, pipa-pipa pelindung, *Arrester*, kabel-kabel, *transformer band*, peralatan grounding, dan lain-lain.
4. SUTR (Saluran Udara Tegangan Rendah) dan SKTR (Saluran Kabel Tegangan Rendah)
Terdiri dari sama dengan perlengkapan/ material pada SUTM dan SKTM yang membedakan hanya dimensinya.



Gambar 2.1 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik

2.3 Klasifikasi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Secara umum, saluran tenaga listrik atau saluran distribusi dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

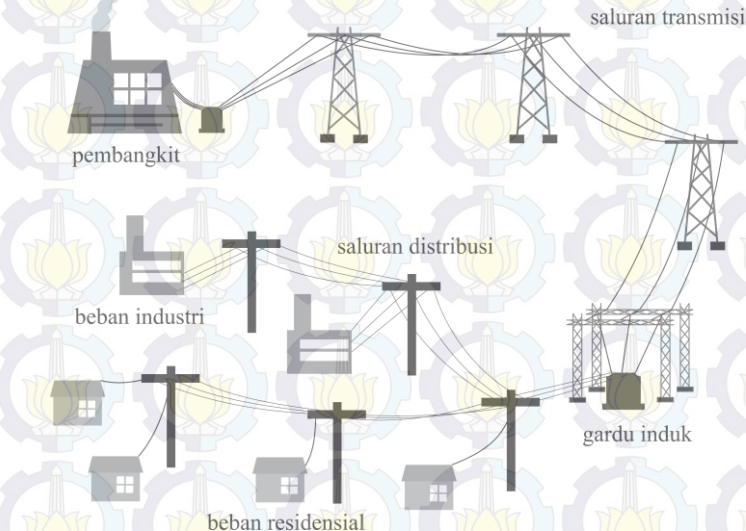
1. Saluran Distribusi Primer

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder trafo *substation* atau Gardu Induk dengan titik primer trafo distribusi dimana saluran ini bertegangan menengah 20kV. Untuk jaringan listrik 70 kV atau 150 kV jika langsung melayani pelanggan bisa disebut jaringan distribusi.

2. Saluran Distribusi Sekunder.

Sistem distribusi sekunder berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan adalah sistem radial. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung dihubungkan ke konsumen/pemakai tenaga listrik dengan melalui peralatan-peralatan sebagai berikut :

- Papan pembagi pada transformator distribusi.
- Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder).
- Saluran Layanan Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai).
- Alat Pembatas dan pengukur daya (kWH meter) serta fuse atau pengamanan pada pelanggan.



Gambar 2.2 Penyaluran daya Listrik

Di Indonesia dalam hal ini PT. PLN menggunakan tegangan sistem distribusi 220/380Volt. Pemakai listrik ini biasanya bergantung kepada Negara pemberi pinjaman atau dalam rangka kerja sama dimana semua peralatan listrik mulai dari pembangkit (generator set) hingga peralatan kerja (motorlistrik) disuplai dari negara pemberi pinjaman atau kerja sama tersebut.

2.4 Jaringan Distribusi Radial Berdasarkan Susunan Rangkaiannya

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi menuju pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan serta kondisi dan situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer dan salah satunya adalah jaringan distribusi radial.

Pada jaringan distribusi radial antara titik sumber dan titik bebannya hanya terdapat satu saluran (*line*), tidak ada alternatif saluran lainnya. Bentuk jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan dalam desain jaringan distribusi. Saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan tersebut, dan bercabang ke titik-titik beban yang dilayani. Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar. Karena kerapatan arus (beban) pada setiap titik sepanjang saluran tidak sama besar, maka luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak harus sama. Sehingga saluran utama (dekat dengan sumber) yang menanggung beban besar, ukuran penampang konduktornya relatif lebih besar dan saluran yang bercabang semakin ke ujung dengan beban yang lebih kecil, ukuran konduktornya menjadi lebih kecil. Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah :

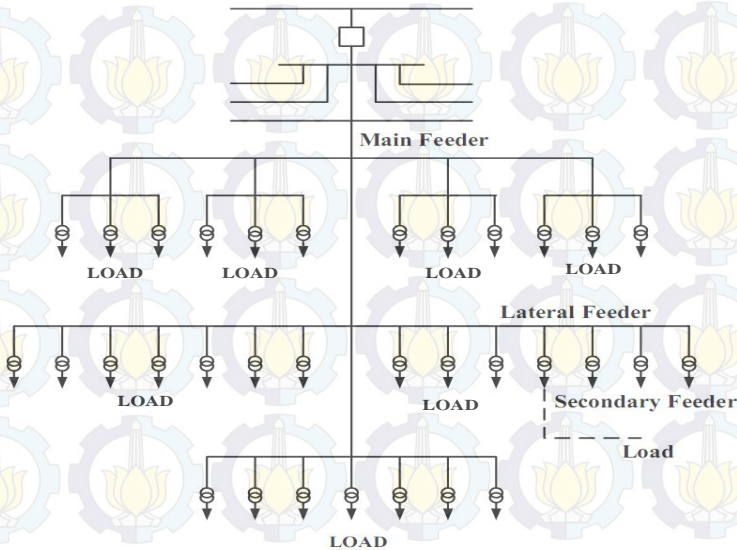
- Kelebihan
 - Bentuk sistemnya lebih sederhana.
 - Biaya investasi relatif murah.
- Kelemahan
 - Kualitas pelayanan daya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.

- Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin, sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami *black out* secara total.

Untuk membatasi gangguan pada jaringan distribusi radial ini dilengkapi dengan peralatan pengaman berupa *fuse*, *sectionalizer*, *recloser*, atau alat pemutus beban lainnya. Tetapi fungsinya hanya membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau di belakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi. Misalnya, gangguan terjadi di titik F, maka daerah beban K, L dan M akan mengalami pemadaman total. Jaringan distribusi radial ini memiliki beberapa bentuk modifikasi, antara lain :

1. Jaringan Distribusi Radial Tipe Pohon

Bentuk jaringan distribusi ini merupakan bentuk yang paling dasar. Satu saluran utama dibentang menurut kebutuhannya, selanjutnya dicabangkan dengan saluran cabang (lateral penyulang) dan lateral penyulang ini bercabang lagi dengan sublateral penyulang (anak cabang).

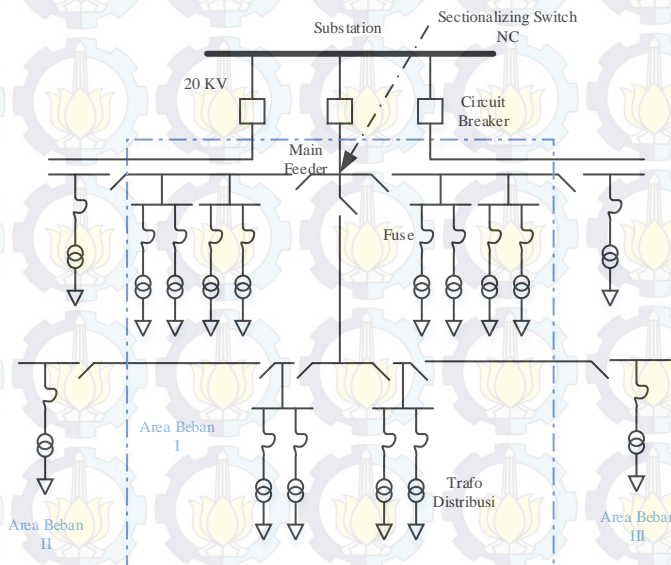


Gambar 2.3 Jaringan distribusi radial tipe pohon^[8]

Arus yang dipikul masing-masing saluran berbeda, arus yang mengalir pada penyulang utama adalah yang terbesar maka penampang konduktor yang digunakan harus yang terbesar, arus pada penyulang lateral yang lebih kecil dari penyulang utama maka ukuran penampang konduktornya lebih kecil dan arus pada sublateral terkecil sehingga ukuran penampang konduktor yang terkecil.

2. Jaringan Distribusi Radial dengan *Tie* dan *Switch* Pemisah

Bentuk ini merupakan modifikasi bentuk dasar dengan adanya penambahan *tie* dan *switch* pemisah, yang digunakan untuk mempercepat pemulihan pelayanan bagi konsumen, dengan cara menghubungkan area yang tidak mengalami gangguan pada penyulang yang mengalami gangguan, dengan penyulang yang tidak mengalami gangguan.



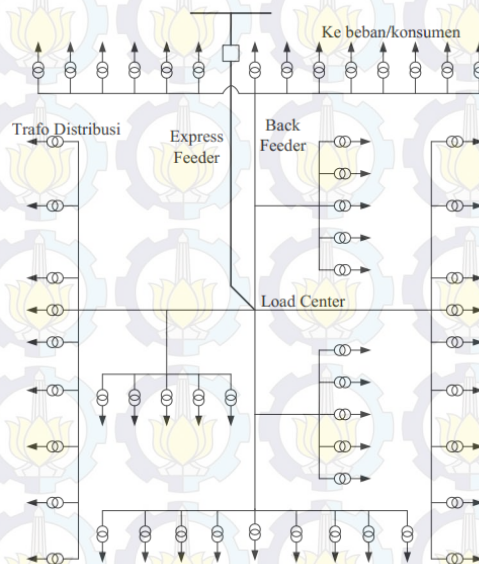
Gambar 2.4 Jaringan distribusi radial tipe *tie* dan *switch*^[8]

Dengan demikian bagian penyulang yang mengalami gangguan dapat dilokalisir dan bagian penyulang lainnya yang tidak mengalami gangguan segera dapat dioperasikan kembali dengan cara melepas *switch* yang terhubung ke titik gangguan, dan menghubungkan bagian

penyulang yang tidak mengalami gangguan ke penyulang di sekitarnya.

3. Jaringan Radial Tipe Pusat Beban

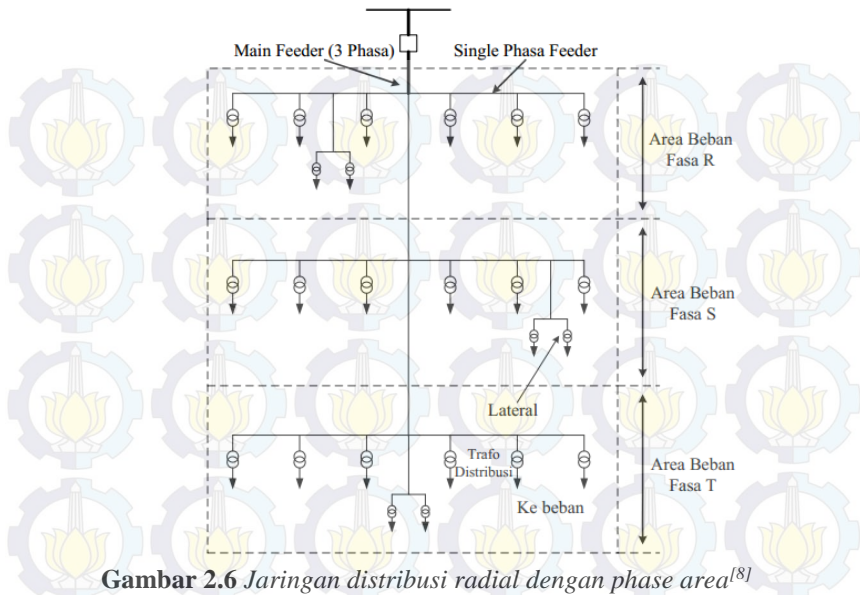
Bentuk ini mensuplai daya dengan menggunakan penyulang utama (*main feeder*) yang disebut "*express feeder*" langsung ke pusat beban, dan dari titik pusat beban ini didistribusikan dengan menggunakan "*back feeder*" secara radial seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Jaringan distribusi radial tipe pusat beban^[8]

4. Jaringan Radial Dengan Phase Area

Pada bentuk ini masing-masing fasa dari jaringan bertugas melayani daerah beban yang berlainan. Bentuk ini akan dapat menimbulkan akibat kondisi sistem 3 fasa yang tidak seimbang (*asimetris*), bila diaplikasikan pada daerah beban yang baru dan belum merata pembagian bebannya. Karena itu jaringan ini cocok untuk daerah yang bebannya stabil dan jika ada penambahan beban maka pembagian bebannya harus dapat diatur merata dan simetris pada setiap fasanya seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Jaringan distribusi radial dengan phase area^[8]

2.5 Sistem Tenaga Listrik Tiga Fasa

Sistem jaringan listrik yang terpasang di Indonesia merupakan jaringan listrik tiga fasa yang disalurkan oleh produsen listrik, dalam hal ini PLN, ke konsumen listrik yakni rumah tangga dan industri. Secara umum sistem tenaga listrik terbagi ke dalam beberapa bagian yakni pembangkitan, penyaluran (transmisi dan distribusi) dan beban. Berikut skema suatu sistem tenaga listrik tiga fasa.



Gambar 2.7 Skema sistem tenaga listrik

Generator akan membangkitkan daya listrik yang akan disalurkan dalam bentuk daya listrik tiga fasa. Pada sistem transmisi dibutuhkan daya yang besar, karena pada sistem transmisi ada kerugian daya yang disebabkan oleh faktor jarak pada saluran. Karena itu, untuk mengurangi

kerugian daya tersebut tegangan akan dinaikkan menggunakan *step-up transformer* menjadi tegangan yang lebih tinggi untuk mengurangi kerugian daya. Agar dapat digunakan oleh konsumen, sebelum didistribusikan, tegangan kembali diturunkan menggunakan *step-down transformer* menjadi 380/220 V. Daya yang diterima oleh konsumen adalah daya listrik arus bolak-balik tiga fasa. Untuk industri daya yang digunakan adalah daya listrik tiga fasa, sedangkan untuk rumah tangga daya yang digunakan adalah daya listrik satu fasa.

2.6 Analisa Aliran Daya

Tujuan utama dari analisis aliran daya adalah untuk mengetahui daya nyata (P) dan daya reaktif (Q) yang mengalir di setiap saluran dengan besar sudut dan fase tegangan pada setiap bus sistem untuk kondisi pembebanan tertentu. Pada umumnya sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua kategori, yaitu Sistem Transmisi dan Sistem Distribusi. Sistem distribusi memiliki beberapa karakteristik diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Sebagian besar menggunakan struktur radial
2. Saluran atau jaringannya tidak bisa dialihkan (*untransposed*)
3. Memiliki bus (*node*) dalam jumlah besar
4. Pembebanan sistem tidak seimbang setiap fasanya
5. Memiliki resistansi (R) dan reaktansi (X) yang tinggi

Karakteristik tersebut perlu diperhitungkan ketika melakukan analisis aliran daya (*load flow*) pada sistem jaringan distribusi. Sistem tersebut harus dianalisis dengan dasar sistem tiga fasa, tidak seperti sistem jaringan transmisi yang dapat dianalisis dengan dasar satu fasa atau fasa tunggal. Dengan alasan tersebut, analisis aliran daya menggunakan *single-phase Newton Raphson* atau *fast decoupled power flow* belum memadai untuk melakukan analisis aliran daya pada sistem jaringan distribusi. Metode yang sering digunakan dalam analisis aliran daya pada sistem jaringan distribusi adalah :

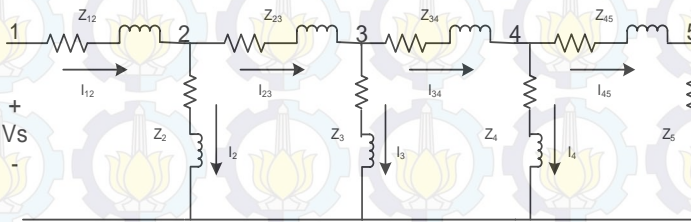
- a. Modifikasi metode Newton Raphson
- b. Metode implisit Z-Bus
- c. Modifikasi metode Gauss-Seidel
- d. Metode *Forward-Backward Sweep*
- e. Metode *Network Topology Based*

Nilai-nilai yang sering muncul dalam perhitungan aliran daya adalah mencakup tegangan, daya aktif, daya reaktif, daya total yang mengalir pada saluran distribusi / antar bus-bus hingga daya aktif dan reaktif yang dihasilkan oleh penyulang. Di bawah ini akan dijelaskan mengenai metode *Forward-Backward Sweep*.

2.7 Metode *Forward-Backward Sweep*

2.7.1 *Linear Network*

Penyulang sistem distribusi memiliki karakteristik *nonlinear* dikarenakan beban diasumsikan memiliki nilai kW dan kvar yang konstan, namun pendekatan untuk karakteristik *nonlinear* merupakan pengembangan dari sistem yang *linear*.



Gambar 2.8 *Linear network*

Gambar 2.8 di atas adalah gambar sistem yang linier dengan mengasumsikan nilai impedansi sudah diketahui dan nilai tegangan sumber sebesar V_s . Perhitungan arus dimulai dari akhir saluran.

$$I_5 = \frac{V_5}{Z_5} \quad (2.1)$$

Maka akan didapatkan nilai I_{45} sama dengan nilai I_5 , kemudian dengan mengaplikasikan hukum Kirchhoff didapatkan tegangan pada titik 4 (V_4).

$$V_4 = V_5 + Z_{45}I_{45} \quad (2.2)$$

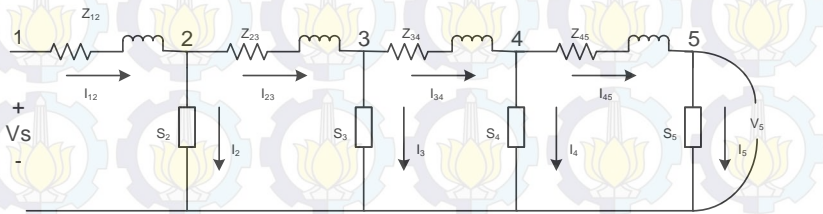
Sehingga nilai I_4 dapat ditentukan

$$I_{34} = I_{45} + I_4 \quad (2.3)$$

Perhitungan di atas dilakukan hingga didapatkan nilai V_1 kemudian dibandingkan dengan nilai V_s . Jika error yang didapat kurang dari toleransi maka analisa dihentikan.

2.7.2 Non-Linear Network

Perhitungan untuk *nonlinear network* adalah modifikasi dari perhitungan untuk *linear network*. Dengan mengganti semua nilai impedansi beban konstan dengan nilai daya kompleks konstan dari beban.



Gambar 2.9 *nonLinear network*

Gambar 2.9 di atas adalah contoh gambar sistem yang tidak linier, perbedaan perhitungan dengan sistem linier terletak pada bagaimana untuk menghitung nilai I_5 .

Dengan mengasumsikan nilai V_5 telah diketahui, maka untuk perhitungan I_5 adalah sebagai berikut :

$$I_5 = \left(\frac{S_5}{V_5} \right)^* \quad (2.4)$$

Maka akan didapatkan nilai I_{45} sama dengan nilai I_5 , kemudian dengan mengaplikasikan hukum Kirchhoff didapatkan tegangan pada titik 4 (V_4).

$$V_4 = V_5 + Z_{45} I_{45} \quad (2.5)$$

Sehingga nilai I_4 dapat ditentukan

$$I_{34} = I_{45} + I_4 \quad (2.6)$$

Perhitungan di atas dilakukan hingga didapatkan nilai V_1 kemudian dibandingkan dengan nilai V_s . Jika error yang didapat kurang dari toleransi maka analisa dihentikan.

2.8 Kuantitas Per Unit (PU)

Definisi satuan per unit untuk suatu kuantitas adalah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam bilangan desimal. Atau dengan kata lain satuan per unit merupakan sistem perkalian guna mempermudah kalkulasi atau proses perhitungan dalam analisis jaringan tenaga listrik. Besaran-besaran sistem dalam satuan masing-masing (tegangan dalam volt, arus dalam ampere, dan impedansi dalam ohm), ditransformasikan ke dalam besaran tak berdimensi yaitu per-unit (disingkat pu). Pada awalnya transformasi ke dalam per-unit dimaksudkan untuk mempermudah perhitungan, namun dengan berkembangnya penggunaan komputer menyebabkan tujuan dari penyederhanaan tersebut kurang berarti lagi. Tetapi, beberapa keuntungan yang terkandung dalam satuan per-unit masih dirasakan. Nilai per-unit dari suatu besaran merupakan rasio dari besaran tersebut dengan suatu besaran basis. Besaran basis ini berdimensi sama dengan dimensi besaran aslinya sehingga nilai per-unit besaran itu menjadi tidak berdimensi.

$$\text{Nilai per-unit} = \frac{\text{Nilai sesungguhnya}}{\text{Nilai basis}} \quad (2.7)$$

Nilai sesungguhnya dapat berupa bilangan kompleks, namun nilai basis yang ditetapkan adalah bilangan nyata. Oleh karena itu, sudut fasa nilai dalam per-unit sama dengan sudut fasa sesungguhnya. Sebagai contoh kita ambil daya kompleks sebagai berikut :

$$S = \bar{V} \cdot \bar{I} = V \cdot I \angle (\alpha - \beta) \quad (2.8)$$

Dimana α adalah sudut fasa tegangan dan β adalah sudut fasa arus. Untuk menyatakan S dalam per-unit, ditentukan dulu S basis yang berupa bilangan nyata sehingga :

$$S_{pu} = \frac{S \angle (\alpha - \beta)}{S_{basis}} = S_{pu} \angle (\alpha - \beta) \quad (2.9)$$

Didefinisikan juga bahwa $S_{basis} = V_{basis} \cdot I_{basis}$ dimana nilai S_{basis} dipilih secara bebas dan biasanya dipilih angka yang memberi kemudahan seperti puluhan, ratusan, dan ribuan. Jika S_{basis} sudah ditentukan maka harus memilih salah satu V_{basis} atau I_{basis} untuk ditentukan secara bebas, tetapi tidak keduanya bisa dipilih bebas. Jika S_{pu} dihitung dari persamaan (2.47) akan didapatkan :

$$S_{pu} = \frac{S}{S_{basis}} = \frac{V \angle \alpha \cdot I \angle -\beta}{S_{basis}} = V_{pu} \cdot I_{pu} \quad (2.10)$$

Nilai basis untuk impedansi ditentukan menggunakan relasi

$$Z_{basis} = \frac{V_{basis}}{I_{basis}} = \frac{V_{basis}^2}{S_{basis}} \quad (2.11)$$

Dengan Z_{basis} ini relasi arus dan tegangan $V = I \cdot Z$ atau $Z = V/I$ akan didapatkan :

$$\frac{Z}{Z_{basis}} = \frac{V/I}{V_{basis}/I_{basis}}, \text{ atau } Z_{pu} = \frac{V_{pu}}{I_{pu}} \quad (2.12)$$

Karena $Z = R + jX$ maka,

$$\frac{Z}{Z_{basis}} = \frac{R + jX}{Z_{basis}} \quad (2.13)$$

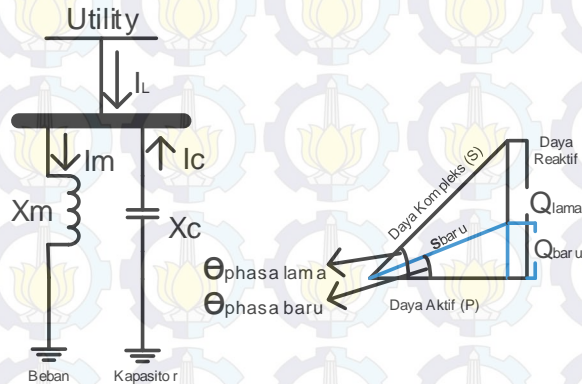
2.9 Kapasitor Shunt

Rugi daya dan *drop* tegangan adalah masalah utama pada jaringan distribusi dimana umumnya radial dan sangat panjang. Tegangan pada jaringan dengan jarak terjauh akan sangat buruk dan diluar dari tegangan yang diinginkan. Sesuai dengan hubungan daya, $P = VI \cos \phi$, jika tegangan turun, maka arus akan menjadi lebih tinggi dibanding saat kondisi tegangan normal dan kondisi tersebut juga akan meningkatkan rugi daya pada jaringan sesuai dengan rumus rugi daya $P = I^2 R$, dimana P (daya aktif), V (Tegangan), I (Arus), dan R (Resistansi).

Untuk mengatasi masalah ini, kapasitor shunt banyak digunakan pada jaringan distribusi. Pemasangan kapasitor kompensator akan meningkatkan nilai tegangan, mengurangi rugi daya, dan meningkatkan penghematan biaya pada jaringan distribusi. Tetapi, untuk mendapat pemasangan yang optimal, maka pemasangan harus sesuai dan juga tepat.

Jika nilai tegangan pada jaringan distribusi menjadi buruk akibat *drop* tegangan, nilai tegangan perlu dijaga dengan menempatkan kapasitor shunt sebagai kompensator daya reaktif. Nilai tegangan yang *drop* ini berakibat pada meningkatnya rugi daya pada jaringan distribusi. Rugi daya pada kabel dan tranformator ada dua jenis: resistif dan reaktif.

Rugi akibat komponen resistif pada beban tidak dapat dihindari. Dan rugi akibat komponen reaktif dapat dihindari. Untuk dapat lebih jelas tentang efek pemasangan kapasitor pada sistem tenaga, ditunjukkan pada gambar 2.10:



Gambar 2.10 pemasangan kapasitor pada sistem

Tanpa pemasangan kapasitor, arus yang mengalir pada saluran, I_L sama dengan arus yang mengalir pada beban I_m . Komponen arus juga terdiri dari komponen riil dan imajiner. Akan tetapi, yang berkontribusi pada rugi daya aktif adalah besaran arus dimana rugi daya berasal dari resistansi saluran dikalikan dengan besar arus saluran yang dikuadrat.

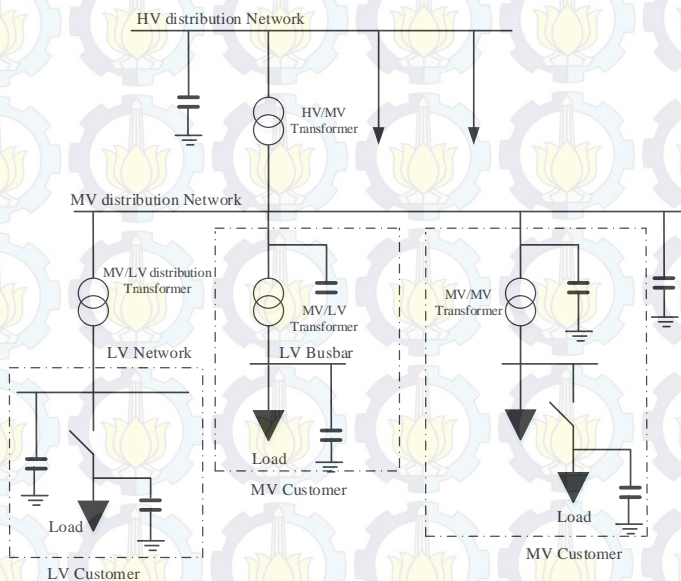
Tetapi dengan pemasangan kapasitor pada sistem, kapasitor shunt ini mensuplai daya reaktif dimana kapasitor menghasilkan arus imajiner murni atau arus reaktif (I_c). Arus reaktif mengurangi komponen imajiner dari arus saluran dimana menghasilkan pengurangan besar arus saluran. Arus saluran yang baru ini mengalir melalui impedansi saluran dan besar drop tegangan berkurang dan power faktor dari sistem meningkat. Pengurangan arus saluran juga rugi daya saluran. Seperti yang digambarkan pada gambar 2.10, hubungan segitiga daya menunjukkan bahwa daya kompleks yang digunakan pada sistem akan berkurang ketika daya reaktif berkurang. Akibat pemasangan kapasitor, total daya reaktif yang dibutuhkan oleh sistem juga berkurang sebesar jumlah kapasitor yang dipasang yang menghasilkan nilai power faktor yang lebih tinggi daripada sebelum adanya pemasangan.

Sedangkan Keuntungan dari penggunaan kapasitor sendiri terbagi menjadi dua, yaitu keuntungan secara ekonomis dan teknis.

Tabel 2.1 Keuntungan Pemasangan Kapasitor

Secara Ekonomis	Secara Teknis
Penurunan biaya listrik yang disebabkan oleh :	Penurunan tegangan drop
Penurunan biaya energi reaktif	Peningkatan daya yang tersedia
Penurunan konsumsi energi aktif dalam KWh (rugi/losses)	Penurunan rugi
	Perbaikan kualitas arus listrik bila digunakan sebagai filter

Sementara untuk pemasangan kapasitor pada jaringan baik transmisi ataupun distribusi adalah:



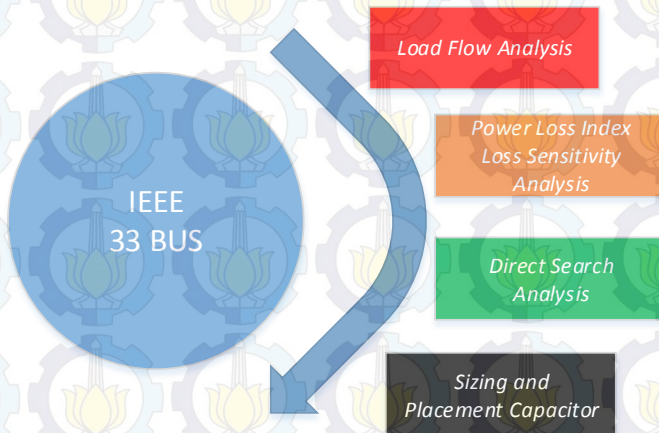
Gambar 2.11 Lokasi Pemasangan kapasitor pada sistem tenaga listrik

1. Kapasitor HV pada jaringan Transmisi HV
2. Kapasitor MV pada jaringan Distribusi MV dan konsumen MV
3. Kapasitor LV pada konsumen MV
4. Kapasitor LV/MV pada kompensasi individual

BAB III

PERANCANGAN PENEMPATAN DAN NILAI KAPASITOR PADA SISTEM IEEE 33 BUS

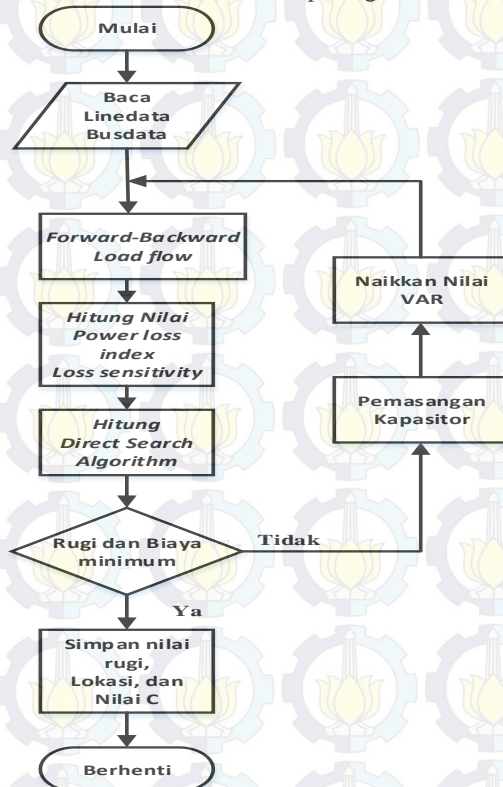
Pada bab III ini akan dijelaskan tentang pengaplikasian dari metode *Power loss Index-Loss Sensitivity* dan *Direct Search Algorithm* pada penentuan lokasi dan nilai dari kapasitor untuk mengurangi kerugian daya. Untuk pengolahan dan simulasi data digunakan software bantu berupa MATLAB. Sistem yang digunakan dalam pengerjaan proyek akhir ini adalah sistem IEEE 33bus dengan base tegangan 12.66 KV.



Gambar 3.1 Blok diagram sistem

Pada tugas akhir ini digunakan kombinasi *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search* sebagai fungsi untuk menentukan lokasi dan nilai dari kapasitor sehingga diharapkan didapatkan pengurangan rugi daya. Langkah-langkah dalam perancangan sistem dan program untuk mendapatkan data yang akan dianalisa adalah pengumpulan data, simulasi *load flow* dengan metode *forward-backward*, penentuan lokasi penempatan kapasitor menggunakan metode *power loss index-loss sensitivity*, dan menentukan nilai kapasitor yang dipasang menggunakan metode *direct search*.

Dengan penggunaan metode ini, diharapkan dengan meletakkan kapasitor dengan nilai yang sesuai dapat menurunkan rugi daya dengan biaya optimal sesuai fungsi objektif pada keseluruhan sistem. Untuk *flowchart* sistem secara keseluruhan ada pada gambar 3.2 dibawah:



Gambar 3.2 *flowchart* sistem

Dari *flowchart* diatas menunjukkan langkah kerja dari sistem yang akan dikerjakan dimulai dari pembacaan data hingga didapatkan lokasi dan nilai optimal kapasitor pada sistem.

3.1 Pengumpulan Data

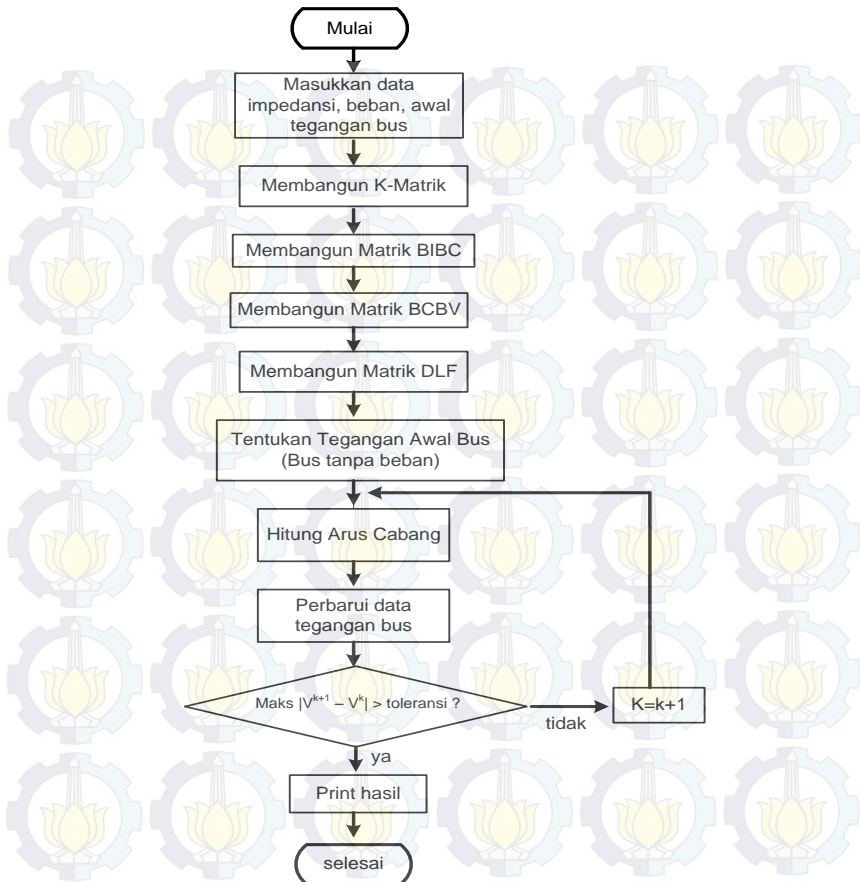
Data yang digunakan dalam tugas akhir adalah data jaringan sistem distribusi IEEE 33 bus . data tersebut akan digunakan dalam analisis aliran daya, *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search* sehingga dapat diketahui bus terlemah yang nantinya akan dipasang kapasitor. Sehingga dapat dilakukan perbaikan untuk mengurangi kerugian daya dengan pemasangan kapasitor dengan ukuran yang juga optimal. Berikut data sistem distribusi IEEE 33 Bus pada lampiran 1.

3.2 Analisa Aliran Daya *forward-backward sweep*

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem penyaluran daya listrik yang langsung terhubung dengan beban. Distribusi daya listrik dari gardu induk transmisi menuju tiap-tiap titik beban disalurkan melalui penghantar yang biasa disebut dengan penyulang (*feeder*). Setiap penyulang didesain sedemikian rupa agar dapat menyalurkan daya dengan efektif dan ekonomis. Sehingga rugi-rugi yang terjadi pada saluran dapat ditekan, serta dengan mekanisme konfigurasi tertentu dapat meningkatkan keandalan sistem.

Sistem distribusi memiliki parameter yang kompleks untuk dianalisis. Salah satu hal yang membuat analisis menjadi kompleks adalah karena sistem distribusi merupakan bagian dari sistem penyaluran daya yang paling dekat dengan beban dan memiliki jumlah node yang banyak serta memiliki jalur yang cukup rumit.

Dalam perkembangan analisis aliran daya pada sistem distribusi menggunakan metode forward-backward, terdapat beberapa pengembangan yang telah dilakukan untuk menambah kekakuratan, kemudahan dan kecepatan perhitungan analisis. Terutama untuk dapat mengakomodir sistem tiga fasa dalam keadaan tidak seimbang, maka perlu adanya rekayasa perhitungan secara matematik menggunakan beberapa cara kalkulasi dan pemodelan sistem.

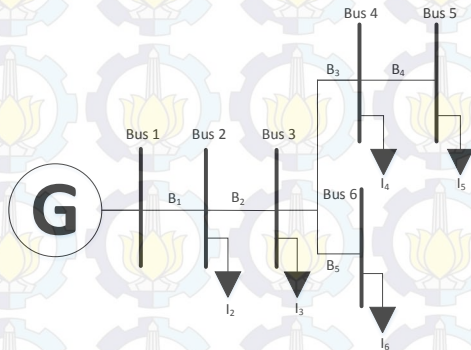


Gambar 3.3 Flowchart load flow

Analisis aliran daya pada sistem distribusi menggunakan metode forward-backward memiliki keefektifan dalam menghitung nilai tegangan pada tiap bus. Namun, apabila diterapkan dalam sistem yang kompleks dan rumit dibutuhkan metode pengembangan lebih lanjut. Metode K-matrik merupakan metode pembentukan matrik impedansi dengan melakukan penelusuran alur/path saluran distribusi. Jalur saluran distribusi direpresentasikan dalam sebuah matrik yang menunjukkan arah arus injeksi dari suatu bus ke bus yang lain. Gambar 3.4 adalah

contoh single line diagram yang akan dianalisa aliran dayanya. Untuk membentuk K-matrik digunakan aturan penelusuran jalur sebagai berikut:

1. $k_{ij} = 1$, jika cabang i berada pada jalur antara bus j dan bus referensi dan memiliki arah yang sama
2. $k_{ij} = -1$, jika cabang i berada pada jalur antara bus j dan bus referensi dan memiliki arah yang berlawanan
3. $k_{ij} = 0$, jika cabang i tidak berada pada jalur antara bus j dan bus referensi



Gambar 3.4 Single Line Diagram Contoh Analisis Menggunakan Metode K-Matrik

Maka untuk contoh single line diagram di atas, K-matrik-nya adalah ditunjukkan pada persamaan sebagai berikut:

$$\begin{matrix} & \text{bus2} & \text{bus3} & \text{bus4} & \text{bus5} & \text{bus6} \\ \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Sebuah sistem distribusi sederhana dengan model rangkaian radial murni disuplai dari satu sumber pada infinite bus menyuplai beban yang tersebar dengan jalur tertentu. Maka didapatkan persamaan sederhana sebagai berikut :

$$B_5 = I_6 \quad (3.1a)$$

$$B_4 = I_5 \quad (3.1b)$$

$$B_3 = I_4 + I_5 \quad (3.1c)$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (3.1d)$$

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (3.1e)$$

Persamaan injeksi arus ke bus di atas dapat diringkas perhitungan selanjutnya dengan menggunakan matrik.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Persamaan matrik di atas dapat dirumuskan menjadi model persamaan dengan komponen matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*).

$$[B] = [BIBC][I] \quad (3.2)$$

Kemudian dibentuk persamaan untuk mencari nilai drop tegangan berdasarkan jalur injeksi arusnya.

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \quad (3.3a)$$

$$V_3 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \quad (3.3b)$$

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \quad (3.3c)$$

$$V_5 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \quad (3.3d)$$

$$V_6 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26} \quad (3.3e)$$

Maka drop tegangan dapat dihitung menjadi sebagai berikut :

$$V_1 - V_2 = B_1 \cdot Z_{12} \quad (3.4a)$$

$$V_1 - V_3 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \quad (3.4b)$$

$$V_1 - V_4 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \quad (3.4c)$$

$$V_1 - V_5 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \quad (3.4d)$$

$$V_1 - V_6 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26} \quad (3.4e)$$

Persamaan di atas dapat dibentuk dan diselesaikan menggunakan suatu bentuk matrik dengan komponen matrik BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*).

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (3.5)$$

Sehingga, untuk mendapatkan nilai ΔV didapatkan persamaan akhir sebagai berikut :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (3.6)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Apabila kita amati bentuk dan komposisi dari matrik BIBC, terdapat persamaan komposisi matrik. Matrik BIBC memiliki komponen yang nilainya berlawanan dengan setiap komponen K-matrik. Sehingga dapat dirumuskan hubungan antara K-matrik dan BIBC sebagai berikut ;

$$[BIBC] = -[K - \text{matrik}] \quad (3.8)$$

Sedangkan bila matrik BIBC kita transpose komposisinya maka akan terbentuk matrik yang berkorelasi dengan matrik BCBV.

$$BIBC' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Apabila matrik BIBC' dikalikan per komponen (perkalian dot) dengan matrik impedansi full branch, maka akan didapatkan matrik BCBV.

$$BCBV = -[K - \text{matrik}]' \cdot [ZF_{BR}] \quad (3.9)$$

$$BCBV = - \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}' \cdot \begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \end{bmatrix}$$

Sehingga, untuk metode K-matrik dapat disimpulkan formula mencari drop tegangan di tiap saluran.

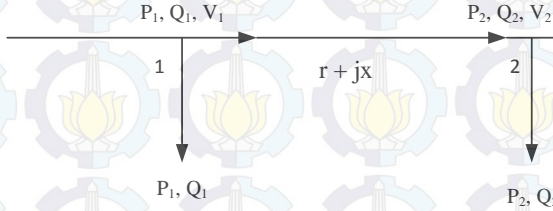
$$[\Delta V] = -[K] \times -[K]' \cdot [ZF_{BR}] \times [I] \quad (3.10)$$

3.3 Power Loss Index – Loss Sensitivity

Untuk dapat menentukan lokasi penempatan kapasitor pada jaringan distribusi maka, pendekatan berbasis *power loss index* dan *loss sensitivity* digunakan

3.3.1. Power Loss Index

Power loss index merupakan metode berdasarkan persamaan aliran daya. Formulasi matematis dari *Power loss index* (PLI) diturunkan dari persamaan tegangan dari dua jaringan bus seperti gambar 3.5.



Gambar 3.5 Jaringan dua Bus

Misalkan sebuah saluran menghubungkan dua bus (1 dan 2), dimana P_1 dan Q_1 adalah daya yang diinjeksikan ke dalam saluran.

Dari sistem sederhana dua bus dapat diturunkan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$|I_1|^2 = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \quad (3.11a)$$

$$|I_1|^2 = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_1^2} \quad (3.11b)$$

$$P_2 = P_1 - P_{loss} \quad (3.12a)$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_{loss} \quad (3.12b)$$

$$P_{loss} = \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) r_1 \quad (3.13a)$$

$$Q_{loss} = \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) X_1 \quad (3.13b)$$

Dari persamaan (3.12a), (3.12b), (3.13a), dan (3.13c) dapat disubstitusikan ke persamaan (3.11b) sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$|I_1|^2 = \frac{\left[P_2 + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) r_1 \right]^2 + \left[Q_2 + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) X_1 \right]^2}{V_1^2} \quad (3.14)$$

Dan mensubstitusikan sisi kiri persamaan (3.14) dengan persamaan (3.11a) yang menjadi

$$V_1^2 = V_2^2 + 2(P_2 r_1 + Q_2 x_1) + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) (r_1^2 + x_1^2) \quad (3.15)$$

Membentuk persamaan kuadrat dalam V_2^2

$$V_2^4 + V_2^2[2(P_2r_1 + Q_2x_1) - V_1^2] + (P_2^2 + Q_2^2)(r_1^2 + x_1^2) = 0 \quad (3.16)$$

Dari persamaan kuadrat V_2^2 dan akan memiliki akar-akar positif jika $b^2 - 4ac \geq 0$, sehingga didapatkan persamaan (3.17)

$$8P_2Q_2r_1x_1 - 4V_1^2(P_2r_1 + Q_2x_1) + V_1^4 - 4(P_2^2x_1^2 + Q_2^2r_1^2) \leq 1 \quad (3.17)$$

Sehingga persamaan *power loss index* adalah:

$$\frac{4[V_1^2(P_2r_1 + Q_2x_1) + (P_2x_1 - Q_2r_1)^2]}{V_1^4} \leq 1 \quad (3.18)$$

Nilai PLI memiliki skala mulai dari 1 sampai dengan 0. Dimana nilai 1 sebagai nilai PLI tertinggi dan 0 sebagai nilai PLI terendah.

3.3.2. Loss Sensitivity

Loss sensitivity factor (LSF) dihitung untuk digunakan menentukan lokasi kandidat untuk penempatan kapasitor. Estimasi dari kandidat bus ini mengurangi pencarian untuk prosedur optimasi.



Gambar 3.6 Jaringan Distribusi dua bus

Jika sebuah jaringan distribusi dengan impedansi Z_{ij} dan sebuah beban P_j, Q_j terhubung antara bus I dan bus J seperti pada gambar 3.6.

Koefisien *loss sensitivity* menjadi berguna pada penempatan kapasitor[1]. Koefisien *loss sensitivity* adalah penurunan dari rugi daya aktif dibanding dengan daya reaktif, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_j} = \frac{2Q_j * R_{ij}}{V_j^2} \quad (3.19a)$$

$$\frac{\partial Q_L}{\partial Q_j} = \frac{2Q_j * X_{ij}}{V_j^2} \quad (3.19b)$$

Dimana faktor *loss sensitivity* merupakan $\left(\frac{\partial P_L}{\partial Q_L}\right)$ digunakan untuk menentukan lokasi potensial dari kapasitor dengan nilai antara 0 sampai dengan 1.

3.4 Direct Search Algorithm

Algoritma *Direct search* digunakan untuk mendapatkan lokasi dan nilai kapasitor yang sesuai yang menghasilkan penurunan rugi daya dan penghematan minimum tanpa mempertimbangkan harmonisa akan didapatkan. Pada penempatan kapasitor, batasan integer nonlinier dengan variabel diskrit menjadi masalah optimasi. Oleh karena itu penggunaan *PLI-LS* digunakan meminimasi pencarian pada optimasi. Fungsi objektif dari *direct search* terdiri dari total biaya rugi daya yang dapat dikompensasi akibat pemasangan beberapa kapasitor pada sistem. Pada sub bab berikut akan dijelaskan setiap bagian untuk membangun algoritma *direct search* untuk nilai optimal kapasitor.

3.4.1. Fungsi Objektif

Fungsi objektif didapatkan untuk mencari biaya minimum dari hubungan antara rugi daya dan kompensasi daya reaktif dari pemasangan kapasitor. *Direct search algorithm* bertujuan untuk mendapatkan penurunan rugi daya dengan nilai kapasitor yang optimal. Untuk mendapatkan penghematan yang sesuai, fungsi objektif *direct search* dirumuskan[3]:

$$F = K_p P_{loss} + \sum_{i=1}^{ncap} K_{ci} Q_{ci} \quad (3.20)$$

Dimana,

K_p = Biaya rugi daya aktif per unit (US\$/KW/tahun)

K_{ci} = Biaya Kapasitor per KVAR (US\$/KVAR)

Q_{ci} = Daya reaktif yang diinjeksikan pada i-bus (KVAR)

N_{cap} = Total unit yang dipasang daya reaktif

P_{losses} = Total rugi daya (KW)

Biaya dari rugi daya diasumsikan bernilai 168 US\$/KW/tahun [5]. Biaya ini berasal dari hubungan antara biaya energi (*energy cost*), waktu bekerja (*utilization time*) untuk rugi per tahun dan faktor

kapasitas (*capacity factor*) dari tipe generator. Diasumsikan tipe generator adalah gas bumi (Eajal and Hawary, 2010), dimana faktor kapasitas dari generator tersebut sekitar 32%. Generator diasumsikan bekerja 24 jam per hari dalam setahun. Sementara untuk biaya kapasitor diasumsikan 3 US\$/kVAR[3]. Persamaan dibawah akan menjelaskan hubungan dari setiap parameter untuk mendapatkan biaya rugi:

$$K_p = \text{energy cost} \times \text{utilization time (annual)} \times \text{capacity factor}$$

$$K_p = (0.06 \text{ US\$/KWh}) \times (8760 \text{ h}) \times (0.32) = 168.2 \text{ US\$/KWh per year}$$

Dimana,

$$\text{Rata-rata biaya energi} = 0.06 \text{ US\$/KWh [6]}$$

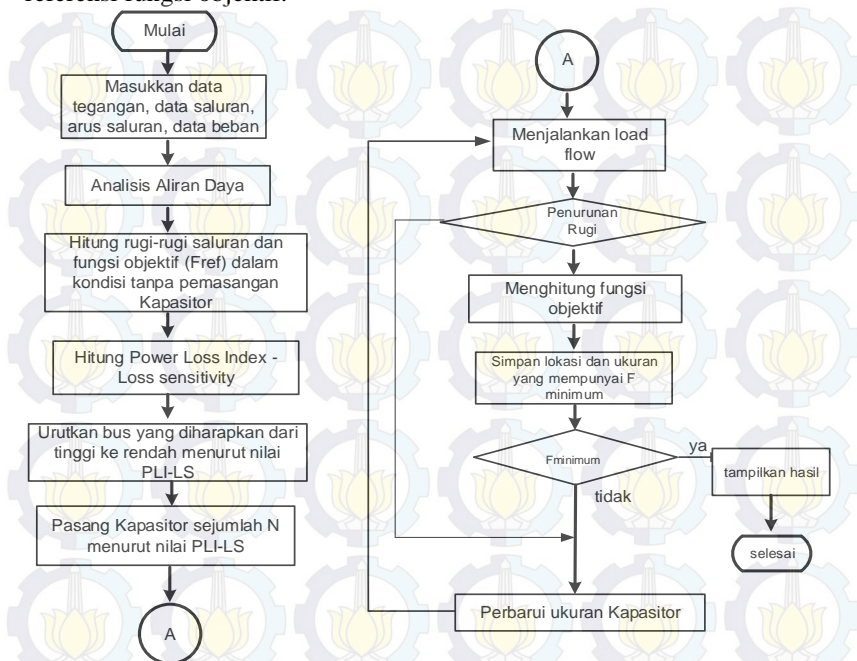
Faktor kapasitas dari tipe pembangkit gas alam dengan pembakaran konvensional= 30-35%[9].

Direct Search algorithm menganalisa dan memilih nilai kapasitor pada bus tertentu dan mendapatkan penghematan optimal pada sistem. Prosedur dari *Direct Search Algorithm* ditunjukkan pada *flowchart* dibawah ini:

Dan untuk langkah-langkah yang dilakukan pada *Direct Search* adalah sebagai berikut:

- Sebagai inisialisasi data, DSA membutuhkan inisialisasi data seperti tegangan bus, impedansi saluran, dan daya beban untuk setiap bus.
- Data tersebut digunakan untuk analisa aliran daya. Setelah itu menghitung fungsi objektif sebelum pemasangan kapasitor dan nilai tersebut sebagai referensi untuk proses nilai kapasitor selanjutnya.
- Dengan hasil dari aliran daya, hitung nilai PLI-LS dan urutkan bus mulai dari tinggi-rendah. Bus yang memiliki nilai PLI-LS akan diprioritaskan karena PLI-LS mengidentifikasi bus yang menyumbang daya reaktif terbanyak.
- Tentukan berapa banyak lokasi yang dipasang kapasitor, setelah itu aliran daya dilakukan untuk menghitung rugi daya setelah pemasangan kapasitor.
- Lalu, hitung hitung fungsi objektif. Dapatkan fungsi objektif minimum dan simpan lokasi dan nilai kapasitor yang mendapat fungsi objektif minimum.
- Karena ada beberapa pilihan nilai kapasitor, jalankan *load flow* untuk setiap nilai kapasitor dengan bus kandidat, simpan hasil setiap nilai kapasitor.
- Hitung kembali fungsi objektif, dan simpan hasil.

Dapatkan biaya terendah dari perhitungan sebelumnya. Perbarui referensi fungsi objektif.



Gambar 3.7 Flowchart Direct Search Algorithm

Dan dalam pemasangan kapasitor, kita juga dapat menghitung apakah dengan pemasangan kapasitor dapat menghasilkan keuntungan atau kerugian dalam pemasangannya dengan menggunakan persamaan[7]:

$$C_t = (\Delta P_{loss} * K_e * 8760 * 10^{-3}) - (PC + IC) \quad (3.21a)$$

Dimana:

$$PC = \sum_{i=1}^{N_{cap}} Kp \quad (3.21b)$$

$$IC = \sum_{i=1}^{N_{cap}} Ki \quad (3.21c)$$

$$\Delta P_{loss} = \frac{P_{loss}(Before\ Installation)}{P_{loss}(after\ Installation)} \quad (3.21d)$$

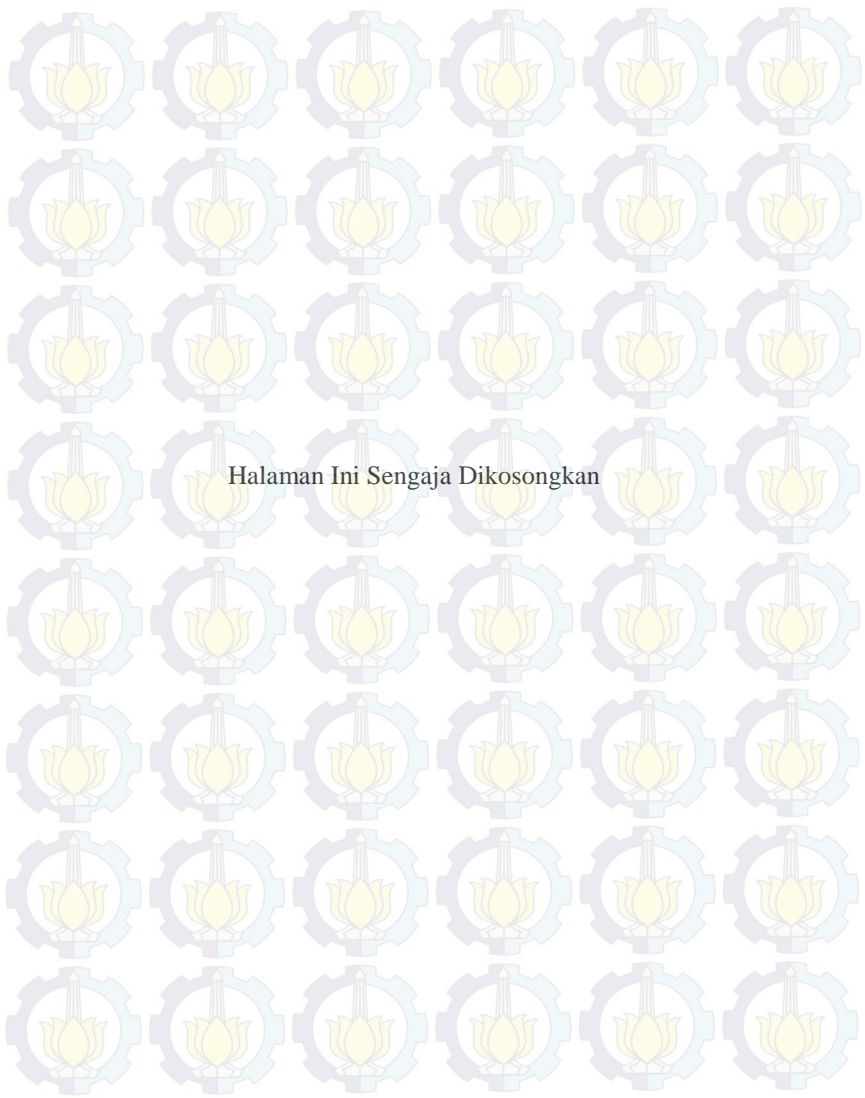
Ke=1.136 \$/KWh

Ki=7500 US\$ (Biaya pemasangan kapasitor per unit)

Kp=5000 US\$ (Biaya pembelian kapasitor per unit)

Asumsi usia kapasitor pada sistem distribusi adalah 10 tahun.

Dengan menggunakan persamaan 3.21a, maka dapat dihitung apakah dengan pemasangan kapasitor dengan nilai tertentu didapatkan keuntungan atau kerugian dalam pemasangannya.



BAB IV

SIMULASI DAN ANALISA DATA

Dalam bab ini membahas tentang hasil simulasi dan juga analisis data yang didapat yang berhubungan tentang kerugian daya berdasarkan studi aliran daya pada sistem IEEE 33Bus. Simulasi dilakukan untuk diolah dengan metode *Power loss Index* dan *loss sensitivity* sehingga diperoleh indeks pada setiap bus. Dari ranking tersebut dapat diketahui bus yang menyumbang daya reaktif terbesar (mendekati 1) sehingga dapat dilakukan pemasangan kapasitor untuk mengurangi kerugian daya dan juga penghematan minimum. Dan juga dilakukan dengan melihat rugi daya yang terjadi pada setiap bus.

4.1 Sistem Distribusi IEEE-33 Bus

Pada sistem IEEE-33 bus digunakan dalam analisa dan simulasi. sistem ini memiliki *base MVA* : 100MVA dan tegangan *line to line* adalah 12.66 KV. Sistem dengan 33 bus dengan konfigurasi sistem 3 fasa radial tipe pohon dan beban yang terpasang terdapat 32 bus (bus 1 sebagai bus sumber). Data beban dan saluran dari sistem IEEE-33bus dapat dilihat pada lampiran 2. Pada tabel 4.1 menunjukkan hasil simulasi *load flow* dengan metode *forward-backward sweep* untuk dianalisa pada metode selanjutnya.

4.2 Analisis Aliran Daya Awal IEEE-33 Bus

Untuk dapat dilakukan analisa penentuan lokasi dan nilai optimal kapasitor. Maka, dilakukan analisa *load flow*. Untuk dapat melakukan analisa *load flow* maka data saluran dan data pembebanan setiap dibutuhkan dalam analisa ini. untuk menjalankan simulasi *load flow*, maka digunakan bantuan *software* MATLAB 2009a. Pada tabel 4.1 dibawah ini menunjukkan hasil simulasi *load flow* dengan metode *forward backward*.

Tabel 4.1 Hasil Analisa Aliran Daya sistem IEEE-33 Bus

No Bus	Fasa	Tegangan		Power Flow		Losses	
		KV	Derajat	KW	KVAR	KW	KVAR
1	R	12,660	0,0000	3797,6580	2723,0494	0,0000	0,0000
	S	12,660	-120,0000	3797,6580	2723,0494	0,0000	0,0000
	T	12,660	120,0000	3797,6580	2723,0494	0,0000	0,0000
2	R	12,588	0,2327	3797,6580	2723,0494	12,7062	6,4771
	S	12,588	-119,7673	3797,6580	2723,0494	12,7062	6,4771
	T	12,588	120,2327	3797,6580	2723,0494	12,7062	6,4771
3	R	12,253	1,4129	3198,6677	2498,4040	54,0983	27,5539
	S	12,253	-118,5871	3198,6677	2498,4040	54,0983	27,5539
	T	12,253	121,4129	3198,6677	2498,4040	54,0983	27,5539
4	R	12,084	2,1224	2139,5616	1941,9732	20,9268	10,6578
	S	12,084	-117,8776	2139,5616	1941,9732	20,9268	10,6578
	T	12,084	122,1224	2139,5616	1941,9732	20,9268	10,6578
5	R	11,920	2,8470	1974,9747	1853,2247	19,6753	10,0209
	S	11,920	-117,1530	1974,9747	1853,2247	19,6753	10,0209
	T	11,920	122,8470	1974,9747	1853,2247	19,6753	10,0209
6	R	11,721	3,7705	1857,2421	1817,3155	40,2524	34,7478
	S	11,721	-116,2295	1857,2421	1817,3155	40,2524	34,7478
	T	11,721	123,7705	1857,2421	1817,3155	40,2524	34,7478
7	R	11,620	2,9969	1037,4959	658,1889	2,0930	6,9185
	S	11,620	-117,0031	1037,4959	658,1889	2,0930	6,9185
	T	11,620	122,9969	1037,4959	658,1889	2,0930	6,9185
8	R	11,472	3,4634	833,8847	537,8186	5,3446	1,7588
	S	11,472	-116,5366	833,8847	537,8186	5,3446	1,7588
	T	11,472	123,4634	833,8847	537,8186	5,3446	1,7588

Tabel 4.1 Hasil Analisa Aliran Daya sistem IEEE-33 Bus (Lanjutan)

9	R	11,351	3,8540	637,7509	414,4058	4,6243	3,3223
	S	11,351	-116,1460	637,7509	414,4058	4,6243	3,3223
	T	11,351	123,8540	637,7509	414,4058	4,6243	3,3223
10	R	11,238	4,2364	572,6225	386,5191	3,9457	2,7967
	S	11,238	-115,7636	572,6225	386,5191	3,9457	2,7967
	T	11,238	124,2364	572,6225	386,5191	3,9457	2,7967
11	R	11,212	4,3267	514,4843	357,8928	0,6143	0,2031
	S	11,212	-115,6733	514,4843	357,8928	0,6143	0,2031
	T	11,212	124,3267	514,4843	357,8928	0,6143	0,2031
12	R	11,167	4,4821	471,7394	321,4569	0,9783	0,3235
	S	11,167	-115,5179	471,7394	321,4569	0,9783	0,3235
	T	11,167	124,4821	471,7394	321,4569	0,9783	0,3235
13	R	11,066	4,8308	412,4378	277,5217	2,9627	2,3310
	S	11,066	-115,1692	412,4378	277,5217	2,9627	2,3310
	T	11,066	124,8308	412,4378	277,5217	2,9627	2,3310
14	R	11,037	4,5960	359,1680	230,8663	0,8106	1,0670
	S	11,037	-115,4040	359,1680	230,8663	0,8106	1,0670
	T	11,037	124,5960	359,1680	230,8663	0,8106	1,0670
15	R	11,018	4,6463	252,9448	132,7232	0,3972	0,3536
	S	11,018	-115,3537	252,9448	132,7232	0,3972	0,3536
	T	11,018	124,6463	252,9448	132,7232	0,3972	0,3536
16	R	10,991	4,7279	194,7046	113,1642	0,3133	0,2288
	S	10,991	-115,2721	194,7046	113,1642	0,3133	0,2288
	T	10,991	124,7279	194,7046	113,1642	0,3133	0,2288
17	R	10,965	4,5017	138,8074	82,8352	0,2801	0,3740
	S	10,965	-115,4983	138,8074	82,8352	0,2801	0,3740
	T	10,965	124,5017	138,8074	82,8352	0,2801	0,3740

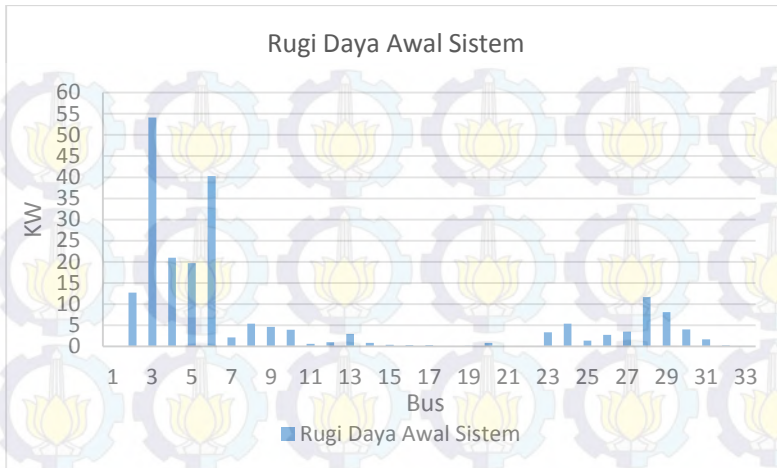
Tabel 4.1 Hasil Analisa Aliran Daya sistem IEEE-33 Bus (Lanjutan)

18	R	10,955	4,5365	82,5663	53,6918	0,0592	0,0464
	S	10,955	-115,4635	82,5663	53,6918	0,0592	0,0464
	T	10,955	124,5365	82,5663	53,6918	0,0592	0,0464
19	R	12,584	0,2414	359,5762	163,6530	0,1616	0,1543
	S	12,584	-119,7586	359,5762	163,6530	0,1616	0,1543
	T	12,584	120,2414	359,5762	163,6530	0,1616	0,1543
20	R	12,542	0,3287	268,8295	122,8958	0,8355	0,7529
	S	12,542	-119,6713	268,8295	122,8958	0,8355	0,7529
	T	12,542	120,3287	268,8295	122,8958	0,8355	0,7529
21	R	12,537	0,2803	179,2944	81,6824	0,1011	0,1182
	S	12,537	-119,7197	179,2944	81,6824	0,1011	0,1182
	T	12,537	120,2803	179,2944	81,6824	0,1011	0,1182
22	R	12,531	0,2201	89,6901	40,6902	0,0438	0,0579
	S	12,531	-119,7799	89,6901	40,6902	0,0438	0,0579
	T	12,531	120,2201	89,6901	40,6902	0,0438	0,0579
23	R	12,179	1,6071	909,8525	511,9500	3,3157	2,2656
	S	12,179	-118,3929	909,8525	511,9500	3,3157	2,2656
	T	12,179	121,6071	909,8525	511,9500	3,3157	2,2656
24	R	12,067	1,9013	812,9231	456,9771	5,3633	4,2351
	S	12,067	-118,0987	812,9231	456,9771	5,3633	4,2351
	T	12,067	121,9013	812,9231	456,9771	5,3633	4,2351
25	R	12,011	2,0531	404,6006	229,5613	1,3441	1,0518
	S	12,011	-117,9469	404,6006	229,5613	1,3441	1,0518
	T	12,011	122,0531	404,6006	229,5613	1,3441	1,0518
26	R	11,687	4,0142	755,9861	1111,6234	2,6861	1,3682
	S	11,687	-115,9858	755,9861	1111,6234	2,6861	1,3682
	T	11,687	124,0142	755,9861	1111,6234	2,6861	1,3682

Tabel 4.1 Hasil Analisa Aliran Daya sistem IEEE-33 Bus (Lanjutan)

27	R	11,643	4,3476	691,1721	1078,4738	3,4401	1,7515
	S	11,643	-115,6524	691,1721	1078,4738	3,4401	1,7515
	T	11,643	124,3476	691,1721	1078,4738	3,4401	1,7515
28	R	11,562	5,0143	619,0825	1044,6626	11,6826	10,300
	S	11,562	-114,9857	619,0825	1044,6626	11,6826	10,300
	T	11,562	125,0143	619,0825	1044,6626	11,6826	10,300
29	R	11,504	5,5322	551,5320	1014,4994	8,1027	7,0589
	S	11,504	-114,4678	551,5320	1014,4994	8,1027	7,0589
	T	11,504	125,5322	551,5320	1014,4994	8,1027	7,0589
30	R	11,453	6,0582	436,7728	922,7531	4,0322	2,0539
	S	11,453	-113,9418	436,7728	922,7531	4,0322	2,0539
	T	11,453	126,0582	436,7728	922,7531	4,0322	2,0539
31	R	11,439	6,1155	366,4141	294,1381	1,6441	1,6248
	S	11,439	-113,8845	366,4141	294,1381	1,6441	1,6248
	T	11,439	126,1155	366,4141	294,1381	1,6441	1,6248
32	R	11,430	6,0580	234,6494	193,5534	0,2199	0,2563
	S	11,430	-113,9420	234,6494	193,5534	0,2199	0,2563
	T	11,430	126,0580	234,6494	193,5534	0,2199	0,2563
33	R	11,424	6,0310	50,3165	51,6551	0,0136	0,0211
	S	11,424	-113,9690	50,3165	51,6551	0,0136	0,0211
	T	11,424	126,0310	50,3165	51,6551	0,0136	0,0211

Dari data tabel diatas, terlihat data tegangan untuk setiap bus, daya yang diserap bus, dan rugi yang terjadi pada setiap bus. Dari data tersebut terlihat pada bus 9 sampai bus 18 nilai tegangan (dalam p.u) berada pada nilai < 0.9 pu. Dan dari hasil *load flow* total rugi daya yang terbangkitkan pada sistem adalah 213.0689 KW pada masing-masing fasa pada sistem distribusi. Berikut adalah plot dari rugi daya awal sistem pada setiap bus. Dan untuk analisa selanjutnya digunakan analisa pada salah satu fasa.



Gambar 4.1 Profil Rugi Daya Awal Sistem

4.3 Hasil Nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada Sistem IEEE-33 Bus

Dari hasil analisa *load flow* pada tabel 4.1, maka dapat dilakukan analisa penentuan lokasi optimal kapasitor dengan menggunakan metode *power loss index-loss sensitivity* pada sistem sehingga dapat diketahui bus mana yang menyumbang banyak daya reaktif pada sistem sehingga perlu dipasang kapasitor.

4.3.1 Hasil *Power Loss Index*

Pada sistem IEEE-33bus dianalisa pada setiap bus dengan menggunakan metode *Power loss index* sehingga dapat diketahui bus yang menyumbang daya reaktif yang besar. Pada tabel 4.2 dibawah ini menunjukkan data *Power Loss Index* setiap bus.

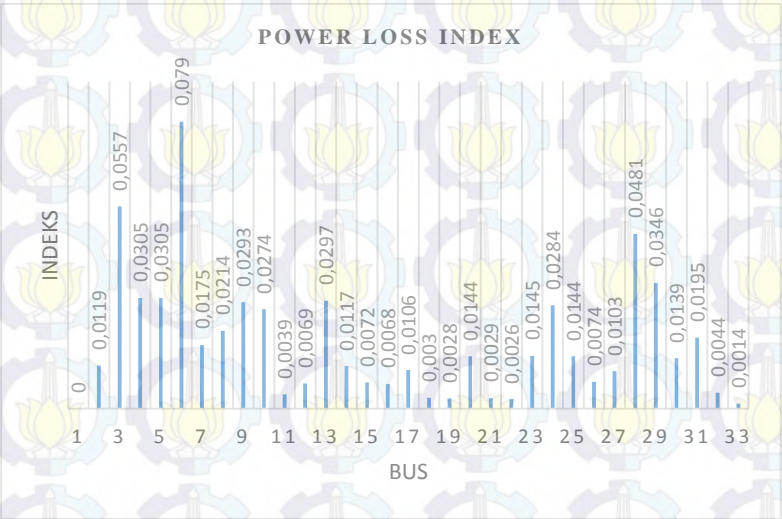
Tabel 4.2 Hasil *Power Loss Index* pada sistem IEEE-33 Bus

No Bus	<i>Power Loss Index</i>
1	0
2	0,0119
3	0,0557
4	0,0305
5	0,0304
6	0,079
7	0,0175
8	0,0214
9	0,0293
10	0,0274
11	0,0039
12	0,0069
13	0,0297
14	0,0117
15	0,0072
16	0,0068
17	0,0106
18	0,003
19	0,0028
20	0,0144
21	0,0029
22	0,0026
23	0,0145
24	0,0284
25	0,0144
26	0,0074

Tabel 4.2 Hasil *Power Loss Index* (Lanjutan)

No Bus	<i>Power Loss Index</i>
27	0,0103
28	0,0481
29	0,0346
30	0,0139
31	0,0195
32	0,0044
33	0,0014

Dari hasil tabel analisa indeks 4.2 pada sistem IEEE-33 bus, dapat dilihat bahwa pada bus 6 memiliki indeks tertinggi yaitu sebesar 0,079 dan indeks terendah adalah 0 pada bus 1. Dan pada gambar 4.2 menunjukkan grafik indeks pada setiap bus.



Gambar 4.2 Grafik *Power Loss Index* Pada IEEE-33 Bus

4.3.2 Hasil *Loss Sensitivity*

Pada sistem IEEE-33bus dianalisa pada setiap bus dengan menggunakan metode *Loss Sensitivity* sehingga dapat diketahui bus yang menyumbang daya reaktif yang besar. Pada tabel 4.3 dibawah ini menunjukkan data *Loss Sensitivity* setiap bus.

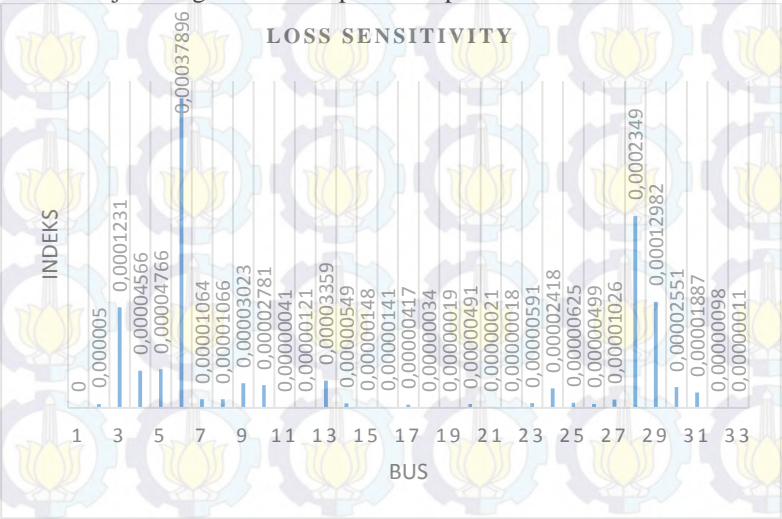
Tabel 4.3 Hasil *Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 Bus

No Bus	<i>Loss Sensitivity</i>
1	0
2	0,000005
3	0,0001231
4	0,00004566
5	0,00004766
6	0,00037896
7	0,00001064
8	0,00001066
9	0,00003023
10	0,00002781
11	0,00000041
12	0,00000121
13	0,00003359
14	0,00000549
15	0,00000148
16	0,00000141
17	0,00000417
18	0,00000034
19	0,00000019
20	0,00000491
21	0,00000021
22	0,00000018
23	0,00000591

Tabel 4.3 Hasil *Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 Bus (Lanjutan)

No Bus	Loss Sensitivity
24	0,00002418
25	0,00000625
26	0,00000499
27	0,00001026
28	0,0002349
29	0,00012982
30	0,00002551
31	0,00001887
32	0,00000098
33	0,00000011

Dari hasil tabel analisa *Loss Sensitivity* 4.3 pada sistem IEEE-33 bus, dapat dilihat bahwa pada bus 6 memiliki indeks tertinggi yaitu sebesar 0,00037896 dan indeks terendah adalah 0 pada bus 1. Dan pada gambar 4.3 menunjukkan grafik indeks pada setiap bus.



Gambar 4.3 Grafik *Loss Sensitivity* Pada IEEE-33 Bus

Dari dua hasil analisa metode *Power Loss Index* dan *Loss Sensitivity* diatas, bisa dilihat nilai pada bus yang sama pada dua metode tersebut bernilai berbeda. Untuk penentuan lokasi kapasitor adalah pada *power loss index* yang memiliki indeks lebih besar dari 0.0304 pada sistem IEEE-33 bus. Bus yang memiliki PLI kurang dari 0.0304 pada sistem IEEE-33 bus tidak memiliki pengurangan daya signifikan. Dengan analisa pada bus yang sama, kita juga menentukan pada metode *loss sensitivity* dengan nilai minimum pada metode *Power Loss Index* (0.0304). pada bus tersebut adalah bus kemungkinan bus potensial untuk penempatan kapasitor. Pada simulasi ini dilakukan analisa penempatan 6 nilai indeks terbesar hingga 1 nilai indeks terbesar. Setelah itu dilakukan analisa dengan nilai kapasitor yang berbeda-beda, sehingga dapat diketahui kombinasi penempatan dan nilai optimal kapasitor.

Pada tabel 4.4 dibawah menunjukkan 6 bus potensial yang akan dipasang kapasitor.

Tabel 4.4 Hasil 6 Bus Potensial dengan metode *Power loss index- Loss sensitivity*

No Bus	Nilai Indeks
6	0,079
3	0,0557
28	0,0481
29	0,0346
4	0,0305
5	0,0304

4.3.3 Hasil Penentuan Lokasi 6 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 6 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0303.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.4 Hasil Penentuan Lokasi 5 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 5 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0304.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.5 Hasil Penentuan Lokasi 4 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 4 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0305.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.6 Hasil Penentuan Lokasi 3 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 4 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0305.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.7 Hasil Penentuan Lokasi 2 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 4 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0305.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.8 Hasil Penentuan Lokasi 1 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 4 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0305.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.4 Hasil *Direct Search Algorithm*

Setelah dilakukan analisa penentuan lokasi kapasitor pada sistem IEEE-33 Bus untuk penentuan lokasi optimal kapasitor, maka untuk penentuan nilai optimal kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*. Untuk penentuan nilai kapasitor maka pada tabel 4.5 dibawah akan diberikan beberapa nilai kapasitor dengan asumsi harga kapasitor per KVAR adalah 3 \$/KVAR [3].

Tabel 4.5 Daftar Nilai Kapasitor

Nilai Qc yang tersedia (KVAR)				
100	350	600	850	1100
150	400	650	900	1150
200	450	700	950	1200
250	500	750	1000	1250
300	550	800	1050	1300

Dengan menggunakan data penentuan lokasi kapasitor, maka analisa DSA dengan menggunakan kondisi nilai kapasitor pada tabel diatas dengan batasan fungsi objektif pada *Direct Search Algorithm* seperti pada rumus (3.20).

4.4.1 Pemasangan 6 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.6 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 6 kapasitor pada sistem dengan 6 nilai indeks terbesar.

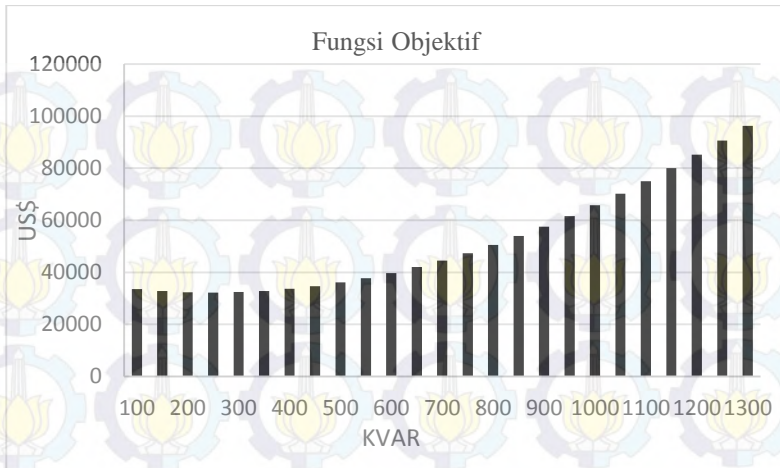
Tabel 4.6 Hasil *Running Direct Search Algorithm* dengan 6 Kapasitor

No	nilaiC	Rugi Daya	Keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	188,86895	37264,36964	33529,983
2	150	179,25674	43284,27102	32815,133
3	200	171,40085	48705,64488	32395,344
4	250	165,28395	53283,80361	32267,703
5	300	160,92722	56756,78514	32435,773

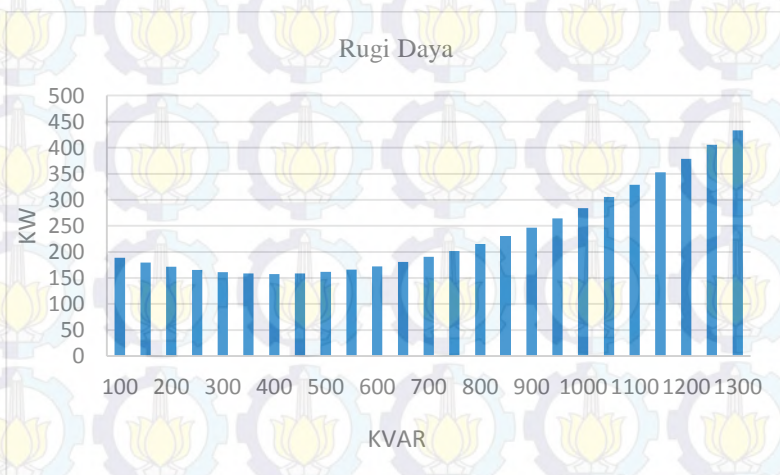
Tabel 4.6 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	Keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
6	350	158,34697	58903,75446	32902,29
7	400	157,55419	59577,53089	33669,103
8	450	158,55434	58728,62175	34737,129
9	500	161,3472	56413,8279	36106,33
10	550	165,92684	52786,76132	37775,709
11	600	172,28172	48073,1431	39743,33
12	650	180,39496	42537,94407	42006,354
13	700	190,24464	36452,56421	44561,1
14	750	201,80425	30068,41571	47403,115
15	800	215,05401	23595,01405	50529,074
16	850	229,95466	17206,23421	53932,383
17	900	246,46391	11029,84944	57605,937
18	950	264,54097	5151,11218	61542,884
19	1000	284,14292	-378,20965	65736,01
20	1050	305,22525	-5532,44139	70177,843
21	1100	328,8041	-10514,02446	75039,089
22	1150	352,98525	-14931,6172	80001,522
23	1200	378,52588	-18984,66623	85192,347
24	1250	405,37374	-22694,55702	90602,789
25	1300	433,47579	-26085,49574	96223,932

Dari hasil data tabel 4.6, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 4.4 Hubungan Fungsi Objektif dan nilai 6 Kapasitor



Gambar 4.5 Hubungan Rugi Daya dan nilai 6 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.4 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 250 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 47.7849 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 165.284 KW dan nilai F sebesar 3527.8704 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733

US\$ menjadi sebesar 32267.70295 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 53283.80361 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 6 kapasitor 250 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 250 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.2 Pemasangan 5 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.7 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 5 kapasitor pada sistem dengan 5 nilai indeks terbesar.

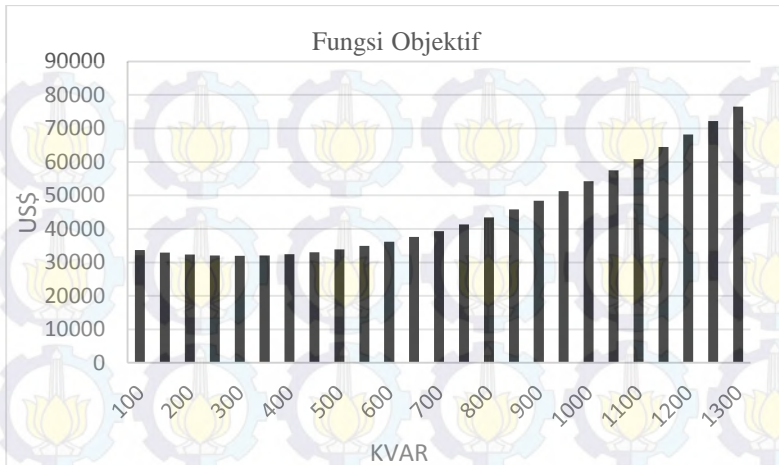
Tabel 4.7 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 5 Kapasitor

No	nilaiC	Rugi Daya	Keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	191,40567	48276,51779	33656,152
2	150	182,45836	53708,72675	32903,004
3	200	174,78364	58811,43251	32363,651
4	250	168,44243	63378,34	32048,328
5	300	163,42144	67245,84674	31954,802
6	350	159,73441	70240,67625	32085,38
7	400	157,39198	72216,22502	32441,853
8	450	156,40154	73069,34217	33025,458

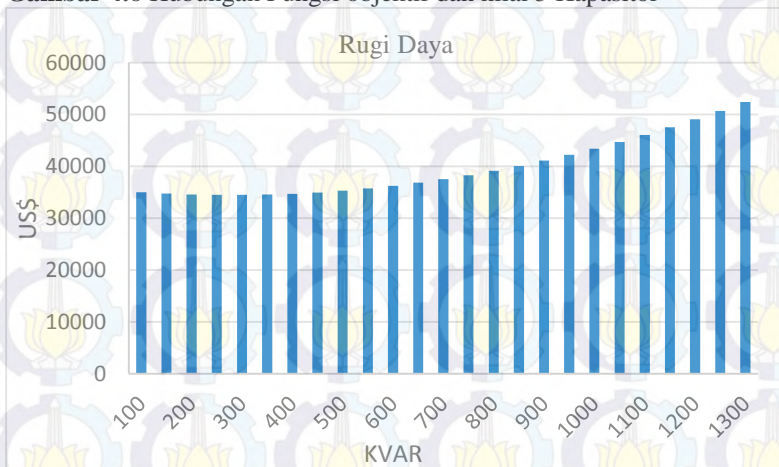
Tabel 4.7 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	Keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
9	500	156,76705	72753,25586	33836,864
10	550	158,48899	71283,7641	34876,15
11	600	161,56433	68737,21558	36142,808
12	650	165,9866	65240,75615	37635,748
13	700	171,74593	60957,09109	39353,317
14	750	178,82931	56066,98846	41293,325
15	800	187,22074	50752,6951	43453,084
16	850	196,90149	45184,57446	45829,451
17	900	207,85922	39507,75791	48420,349
18	950	220,06706	33849,0538	51221,267
19	1000	233,49511	28308,12526	54227,179
20	1050	248,11592	22957,045	57433,474
21	1100	263,90067	17845,5822	60835,313
22	1150	280,81951	13004,91547	64427,678
23	1200	298,84182	8451,42711	68205,425
24	1250	317,93654	4190,20655	72163,338
25	1300	339,36908	-21,55275	76514,006

Dari hasil data tabel 4.7, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 4.6 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 5 Kapasitor



Gambar 4.7 Hubungan Rugi Daya dan nilai 5 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.6 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 300 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 49.6474 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 163.421 KW dan nilai F sebesar 3840.7712 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733 US\$ menjadi sebesar 31954.80215 US\$ dengan pemasangan kapasitor

tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 67245.84674 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 5 kapasitor 300 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 300 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.3 Pemasangan 4 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.8 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 4 kapasitor pada sistem dengan 4 nilai indeks terbesar.

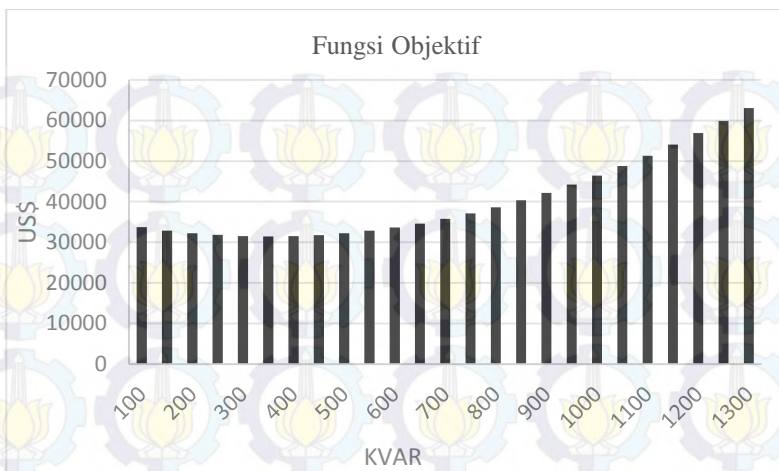
Tabel 4.8 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 4 Kapasitor

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	193,44876	59606,56279	33699,391
2	150	185,12553	64534,46429	32901,089
3	200	177,79846	69254,42718	32270,141
4	250	171,53394	73609,66966	31817,701
5	300	166,31145	77491,24057	31540,324
6	350	162,14259	80769,17688	31439,955
7	400	159,03687	83322,8743	31518,195
8	450	157,0016	85051,19085	31776,269
9	500	156,04175	85881,92859	32215,013
10	550	156,15987	85779,1421	32834,858
11	600	157,35609	84746,94741	33635,824
12	650	159,62807	82829,09869	34617,517

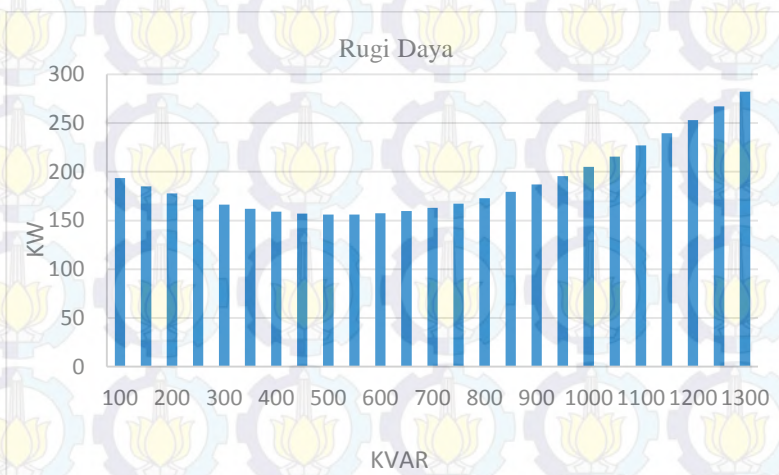
Tabel 4.8 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
13	700	162,97105	80104,41387	35779,137
14	750	167,37792	76678,91839	37119,49
15	800	172,8393	72676,10881	38637,003
16	850	179,34375	68226,88708	40329,75
17	900	186,87784	63460,5024	42195,477
18	950	195,42639	58497,39152	44231,633
19	1000	204,98711	53437,00847	46437,834
20	1050	215,52528	48379,42443	48808,248
21	1100	227,02355	43396,71225	51339,957
22	1150	239,4609	38545,78458	54029,431
23	1200	252,81543	33868,50963	56872,992
24	1250	267,06456	29393,73757	59866,845
25	1300	282,18521	25139,49055	63007,116

Dari hasil data tabel 4.8, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 4.8 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 4 Kapasitor



Gambar 4.9 Hubungan Rugi Daya dan nilai 4 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.8 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 350 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 50.9263 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 162.143 KW dan nilai F sebesar 4355.6179 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733

US\$ menjadi sebesar 31439.95545 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 80769.17688 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 5 kapasitor 350 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 350 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.4 Pemasangan 3 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.9 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 3 kapasitor pada sistem dengan 3 nilai indeks terbesar.

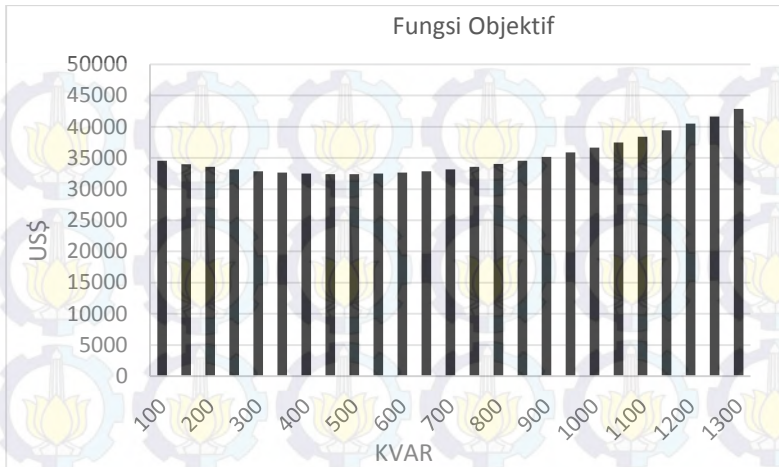
Tabel 4.9 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 3 Kapasitor

No Cap	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	200,18476	68418,4164	34531,041
2	150	194,38279	71579,89055	34006,308
3	200	189,01346	74678,53814	33554,261
4	250	184,08092	77684,41894	33175,594
5	300	179,56544	80580,92825	32866,993
6	350	175,52669	83297,88857	32638,484
7	400	171,93492	85821,3893	32485,067
8	450	168,79313	88116,80344	32407,246
9	500	166,104	90150,46581	32405,472
10	550	163,86991	91890,76504	32480,145
11	600	162,0929	93309,26968	32631,606

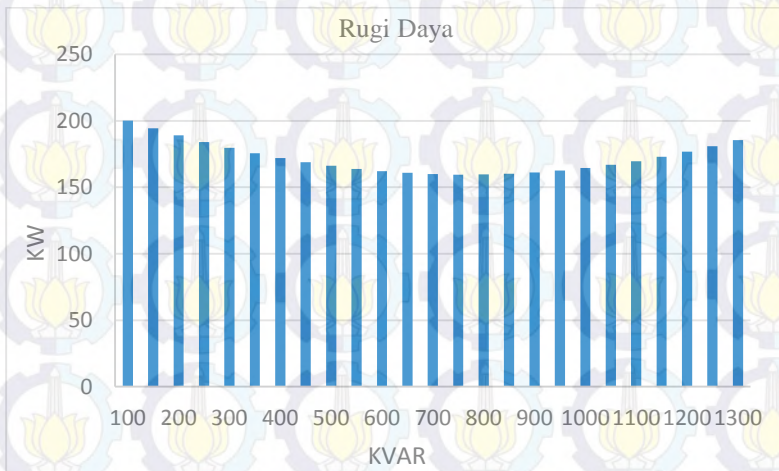
Tabel 4.9 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
12	650	160,77465	94381,82156	32860,141
13	700	159,91651	95089,52312	33165,973
14	750	159,51945	95419,54702	33549,268
15	800	159,5841	95365,70495	34010,128
16	850	160,11067	94928,72977	34548,593
17	900	161,09906	94116,24713	35164,642
18	950	162,54873	92942,43906	35858,187
19	1000	164,45883	91427,42687	36629,083
20	1050	166,82809	89596,42276	37477,119
21	1100	169,65491	87478,71531	38402,026
22	1150	172,93735	85106,56154	39403,474
23	1200	176,67308	82514,05833	40481,077
24	1250	180,85949	79736,05885	41634,394
25	1300	185,49361	76807,18735	42862,927

Dari hasil data tabel 4.9, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 4.10 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 3 Kapasitor



Gambar 4.11 Hubungan Rugi Daya dan nilai 3 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 500 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 46.9649 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 166.104 KW dan nilai F sebesar 3390.1009 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733

US\$ menjadi sebesar 32405.47241 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 90150.46581 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 3 kapasitor 500 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 500 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.5 Pemasangan 2 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.8 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 2 kapasitor pada sistem dengan 2 nilai indeks terbesar.

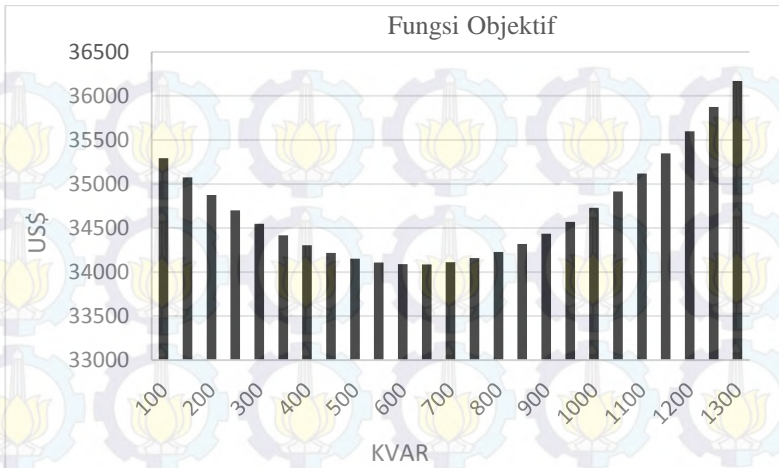
Tabel 4.10 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 3 Kapasitor

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	206,5047	77676,85458	35292,79
2	150	203,4154	79236,22498	35073,787
3	200	200,45531	80775,46088	34876,493
4	250	197,62495	82290,36682	34700,991
5	300	194,92479	83776,58855	34547,364
6	350	192,35529	85229,63236	34415,689
7	400	189,91692	86644,88766	34306,043
8	450	187,6101	88017,65288	34218,497
9	500	185,43525	89343,16465	34153,122
10	550	183,39276	90616,63005	34109,984
11	600	181,48302	91833,26172	34089,148

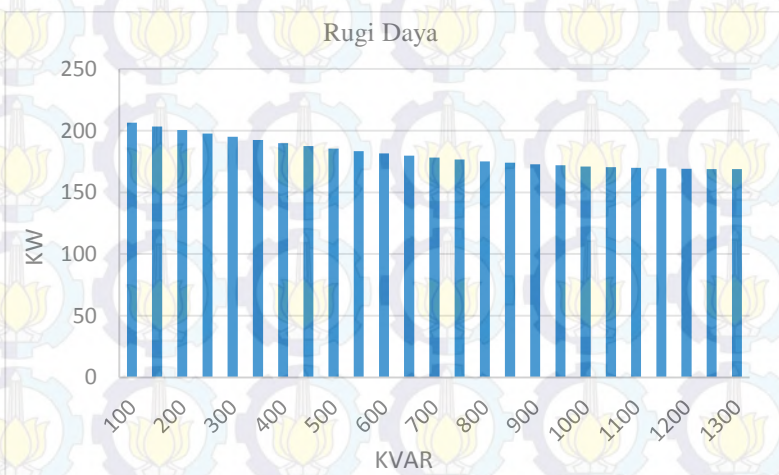
Tabel 4.10 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
12	650	179,68031	93005,43837	34086,291
13	700	178,04091	94092,02632	34110,874
14	750	176,53515	95107,82702	34157,905
15	800	175,16331	96048,48285	34227,437
16	850	173,92568	96909,84629	34319,515
17	900	172,82252	97688,02239	34434,183
18	950	171,85407	98379,4103	34571,483
19	1000	171,02054	98980,74293	34731,45
20	1050	170,32213	99489,12409	34914,119
21	1100	169,75903	99902,06218	35119,518
22	1150	169,33139	100217,5	35347,673
23	1200	169,03934	100433,8396	35598,609
24	1250	168,88299	100549,9622	35872,343
25	1300	168,86244	100565,2421	36168,89

Dari hasil data tabel 4.10, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan hubungan tersebut.lo



Gambar 4.12 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 2 Kapasitor



Gambar 4.13 Hubungan Rugi Daya dan nilai 2 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.12 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 650 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 33.3886 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 179.680 KW dan nilai F sebesar 1709.2819 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733

US\$ menjadi sebesar 34086.29142 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 93005.43837 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 2 kapasitor 650 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 350 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.6 Pemasangan 1 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.11 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 1 kapasitor pada sistem dengan nilai indeks terbesar.

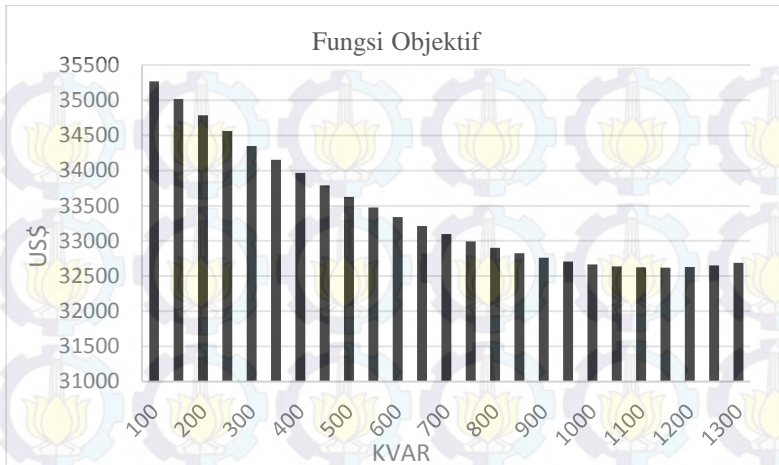
Tabel 4.11 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 1 Kapasitor

No Cap	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	208,13756	89371,34574	35267,11
2	150	205,77684	90540,03603	35020,51
3	200	203,48645	91699,82732	34785,724
4	250	201,26665	92849,06199	34562,798
5	300	199,1177	93986,02714	34351,774
6	350	197,03985	95108,95801	34152,695
7	400	195,03334	96216,04203	33965,602
8	450	193,09842	97305,4234	33790,534
9	500	191,2353	98375,20822	33627,53
10	550	189,44421	99423,47025	33476,627
11	600	187,72537	100448,2572	33337,862

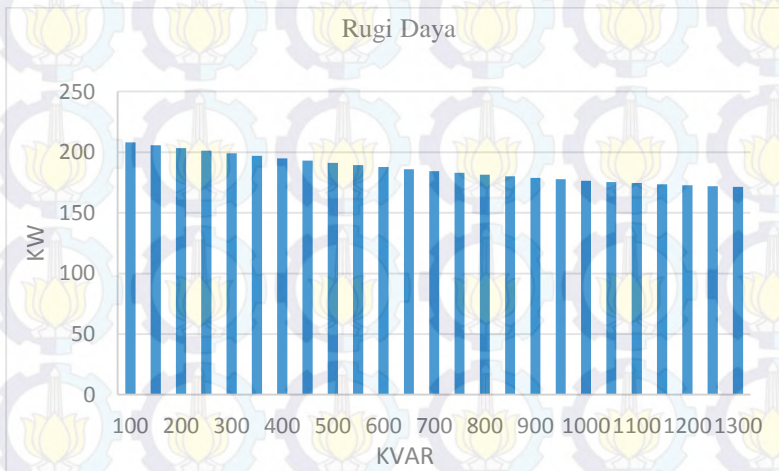
Tabel 4.11 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
12	650	186,07898	101447,5976	33211,269
13	700	184,50526	102419,5083	33096,883
14	750	183,00438	103362,0021	32994,735
15	800	181,55213	104288,7911	32900,757
16	850	180,20065	105164,6875	32823,709
17	900	178,92246	106005,2667	32758,973
18	950	177,7177	106808,6199	32706,573
19	1000	176,58653	107572,88	32666,537
20	1050	175,5291	108296,2316	32638,888
21	1100	174,54553	108976,9206	32623,649
22	1150	173,63596	109613,2643	32620,84
23	1200	172,80049	110203,6615	32630,483
24	1250	172,03925	110746,6015	32652,595
25	1300	171,35233	111240,6735	32687,192

Dari hasil data tabel 4.11, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 hubungan tersebut.



Gambar 4.14 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 1 Kapasitor



Gambar 4.15 Hubungan Rugi Daya dan nilai 1 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.14 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 1150 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 39.4329 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 173.636 KW dan nilai F sebesar 3174.7328 US\$ dari nilai awal F adalah

35795.5733 US\$ menjadi sebesar 32620.84046 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 110203.66153 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 1 kapasitor 1150 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 1150 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.5 Analisa Sistem Keseluruhan

Dari analisa kasus diatas dapat dilihat bahwa dengan menggunakan kombinasi penentuan lokasi *power loss index-loss sensitivity* dan nilai kapasitor dengan *Direct Search* yang tepat didapatkan penurunan rugi yang lebih besar dibandingkan dengan meminimalisasi atau memaksimalkan jumlah kapasitor. Dan dengan menurunkan nilai indeks secara tepat didapatkan penurunan nilai fungsi objektif pada *Direct Search Algorithm* lebih besar dengan menaikkan nilai KVAR pada kapasitor.

Tabel 4.12 Nilai F dan Rugi pada sistem pada setiap kasus

No	Keterangan (Berdasarkan nilai <i>Power Loss Index-Loss Sensitivity</i>)	Nilai F Minimum (US\$)	Rugi (KW)	Nilai Kapasitor
1	6 Kapasitor	32267,70295	165,284	250
2	5 Kapasitor	31954,80215	163,421	300
3	4 Kapasitor	31439,95545	162,143	350
4	3 Kapasitor	32405,47241	166,104	500
5	2 Kapasitor	34086,29142	179,68	650
6	1 Kapasitor	32620,84046	173,636	1150



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sushanta Paul, Ward Jewell, “Optimal Capacitor Placement and Sizes for Power Loss Reduction Using Combined Power Loss Index-Loss Sensitivity Factor and Genetic Algorithm”, IEEE, 2012
- [2] Fitriana Suhartati, Dimas Fajar U.P., Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto, “Capacitor Placement and Sizing in Distorted Distribution Systems Using Simplified Direct Search Algorithm”, Journal of Clean Energy Technologies, Vol.2, No.4, October 2014
- [3] M. Ramalinga Raju, K.V.S. Ramachandra Murthy, K.Ravindra, “Direct Search algorithm for capacitive compensation in radial distribution systems”, electrical Power and Energy Systems, vol.42, pp. 24-30. 2012.
- [4] Nova Gama, Fielman Lisi , M Tuegeh, A.F. Nelwan, ”Aliran Daya Optimal Pada Sistem Minahasa, Jurusan Teknik Elektro-FT, UNSRAT, Manado-95115
- [5] Ejajal, A.A., El-Hawary, M.E., (2010). Optimal Capacitor Placement and Sizing in Unbalanced Distribution System with Harmonics Consideration Using Particle Swarm Optimization. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol 25, No. 3. Pp 1734-1741
- [6] Rahman, Abdel.T.k, G.B Jasmon, “ A new Technique For Voltage Stability Analysis in A Power System an Improve Algorithm For Distribution Network”, IEEE Catalogue
- [7] Yun Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po Wang, Evan Liu, Benjamin Yue, “Optimal Capacitor Placement to Distribution Transformers for Power Loss Reduction in Radial Distribution System”, IEEE, 2013
- [8] repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/29935/3/Chapter%20II.pdf
- [9] Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2014, www.eia.gov/forecasts/aeo/electricity_generation.cfm,



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisa data pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

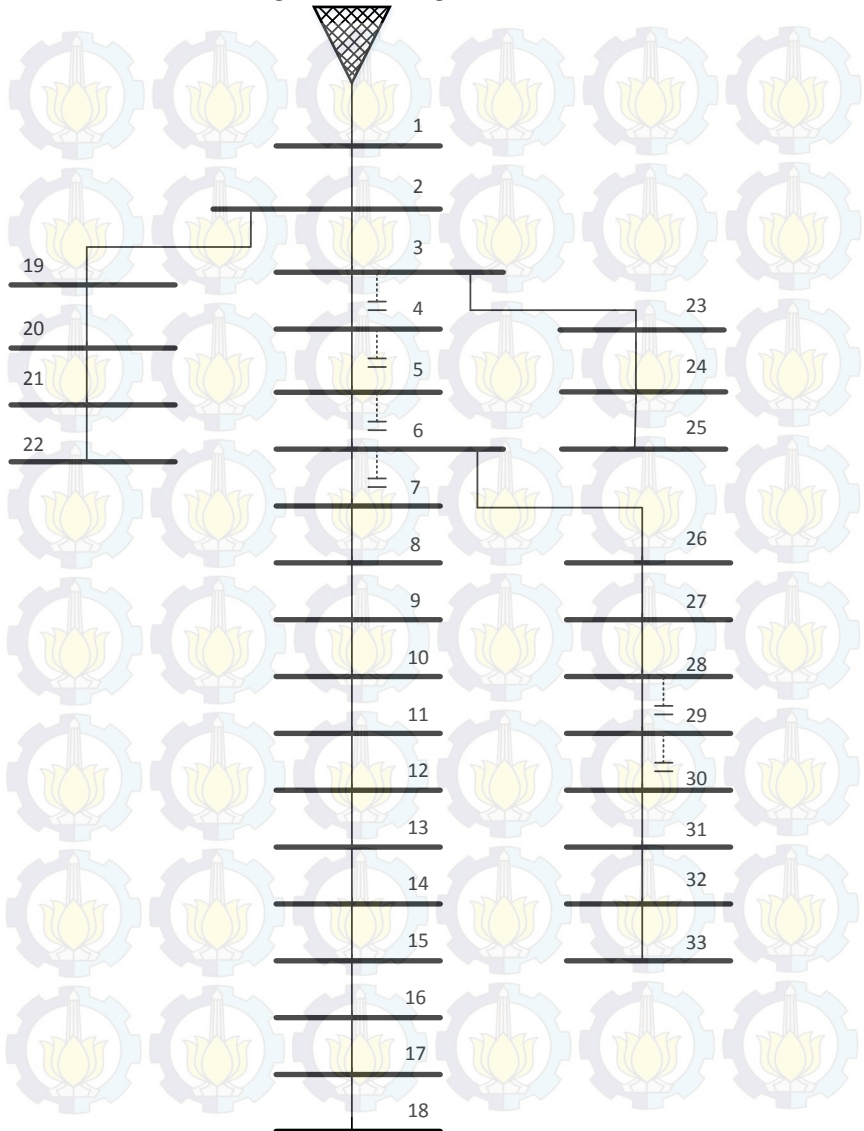
1. Metode *Power Loss Index* dan *Loss Sensitivity* dapat digunakan untuk menentukan indeks bus dalam suatu jaringan distribusi untuk mengetahui bus yang mengalami rugi terbesar.
2. Rugi daya yang terjadi pada jaringan distribusi disebabkan arus yang mengalir pada setiap bus tidak sama. Karena bus yang terdekat dengan sumber memiliki arus yang lebih besar dibanding bus yang jauh dari sumber dan hal ini menyebabkan rugi yang terjadi semakin besar.
3. Metode *Direct Search Algorithm* digunakan untuk menentukan nilai optimal kapasitor sesuai dengan fungsi objektif.
4. Untuk menurunkan kerugian daya pada suatu jaringan distribusi dapat menggunakan kompensasi daya reaktif berupa pemasangan kapasitor. Dan lebih efektif dengan penentuan letak dan nilai yang tepat menggunakan metode *Power Loss Index-Loss sensitivity* dan *Direct Search algorithm*.
5. Pada sistem IEEE-33 Bus indeks rugi tertinggi pada bus 3 sebesar 54,0983 KW dan rugi daya pada keseluruhan sistem adalah 213,0689 KW.
6. Dengan menggunakan kombinasi yang tepat antara metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity* dan *Direct Search* bisa didapat lokasi dan nilai optimal kapasitor dibandingkan dengan memaksimalkan salah satu metode.
7. Setelah dilakukan analisa pemasangan dan nilai kapasitor pada sistem IEEE-33 bus, didapat penurunan rugi daya pada sistem sebesar 50,9263 KW dari nilai rugi daya awal semula dengan 4 buah kapasitor dengan masing nilai 350 KVAR.

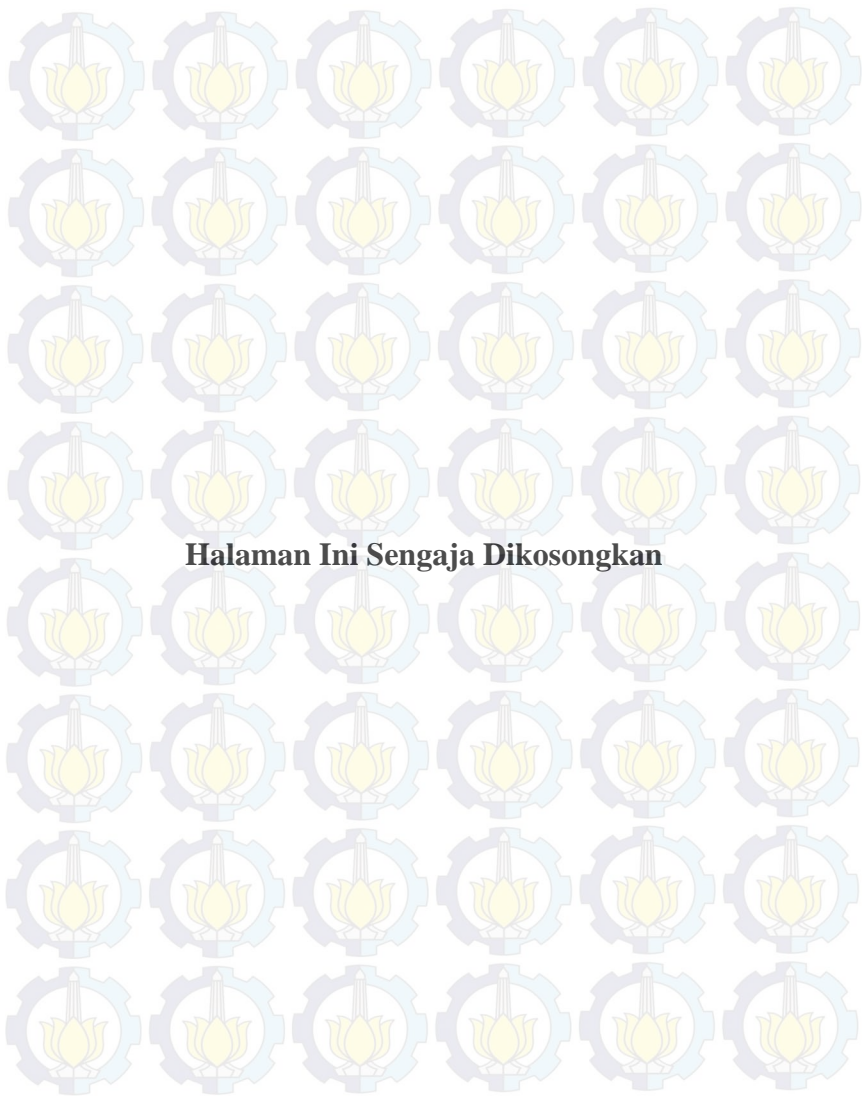
5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity* dan *Direct Search* dapat dikombinasikan dengan metode lain untuk optimasi lokasi dan nilai kapasitor.
2. Pada analisa optimasi kapasitor selanjutnya dapat dikembangkan dengan adanya pemasangan transformator atau pada sistem jaringan distribusi radial yang tidak seimbang.
3. Untuk optimasi pemasangan kapasitor dapat dipelajari lebih lanjut dengan menggunakan metode yang lainnya.
4. Pada analisa *Placement and sizing* selanjutnya dapat ditambahkan komponen optimasi lain selain kapasitor.

LAMPIRAN 1 : *Single Line Diagram IEEE-33 Bus*





Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

LAMPIRAN 2 : Data Saluran dan Beban Sistem IEEE-33 Bus

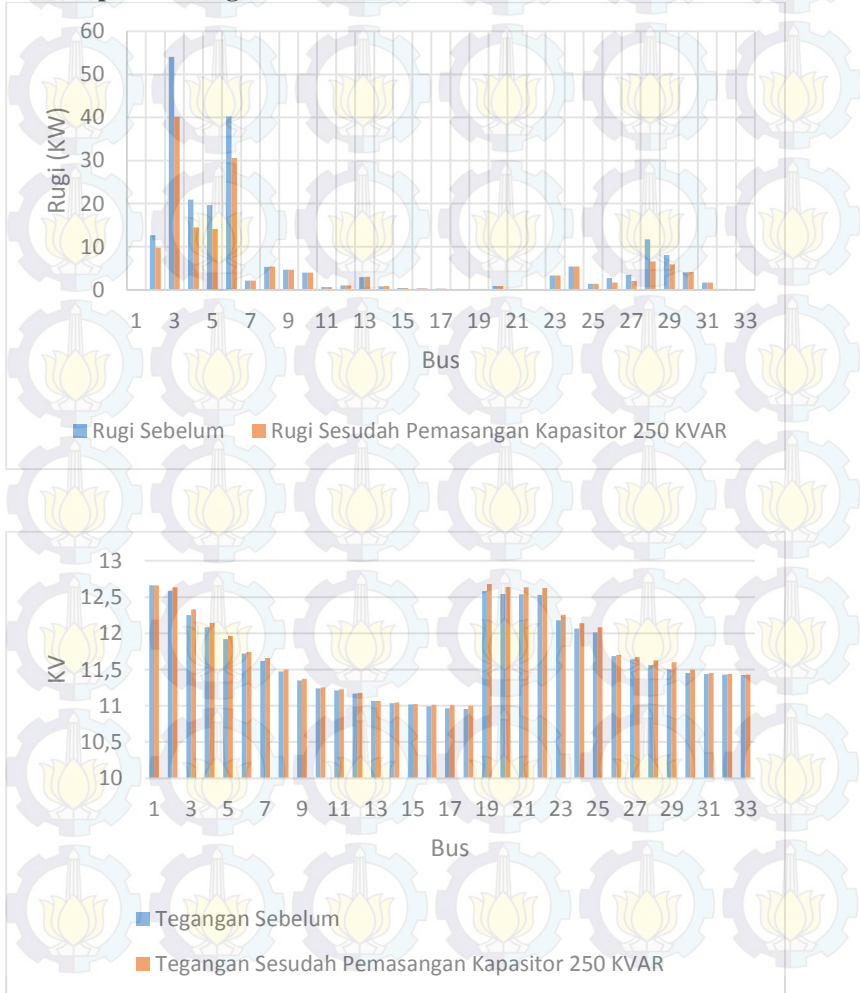
Dari Bus	Ke Bus	R (ohm)	X(ohm)
1	2	0.0922	0.047
2	3	0.493	0.2511
3	4	0.366	0.1864
4	5	0.3811	0.1941
5	6	0.819	0.707
6	7	0.1872	0.6188
7	8	0.7114	0.2351
8	9	1.03	0.74
9	10	1.044	0.74
10	11	0.1966	0.065
11	12	0.3744	0.1298
12	13	1.468	1.155
13	14	0.5416	0.7129
14	15	0.591	0.526
15	16	0.7463	0.545
16	17	1.289	1.721
17	18	0.732	0.574
2	19	0.164	0.1565
19	20	1.5042	1.3554
20	21	0.4095	0.4784
21	22	0.7089	0.9373
3	23	0.4512	0.3083
23	24	0.898	0.7091
24	25	0.896	0.7011
6	26	0.203	0.1034
26	27	0.2842	0.1447
27	28	1.059	0.9337
28	29	0.8042	0.7006
29	30	0.5075	0.2585
30	31	0.9744	0.963
31	32	0.3105	0.3619
32	33	0.341	0.5302

Bus	P(kW)	Q(VAR)
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40

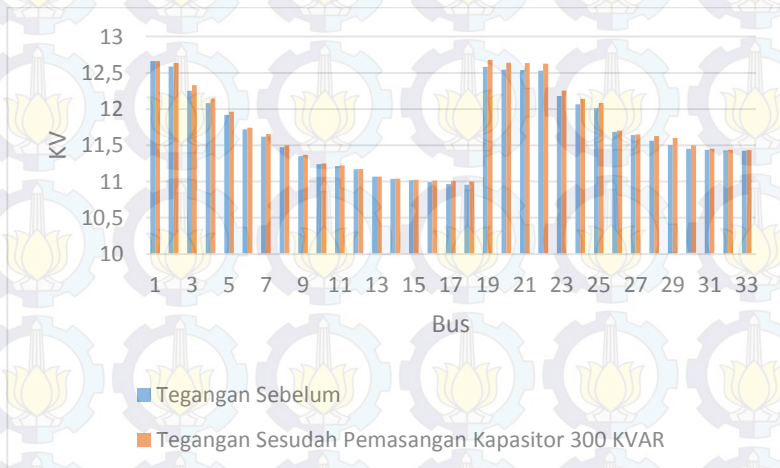
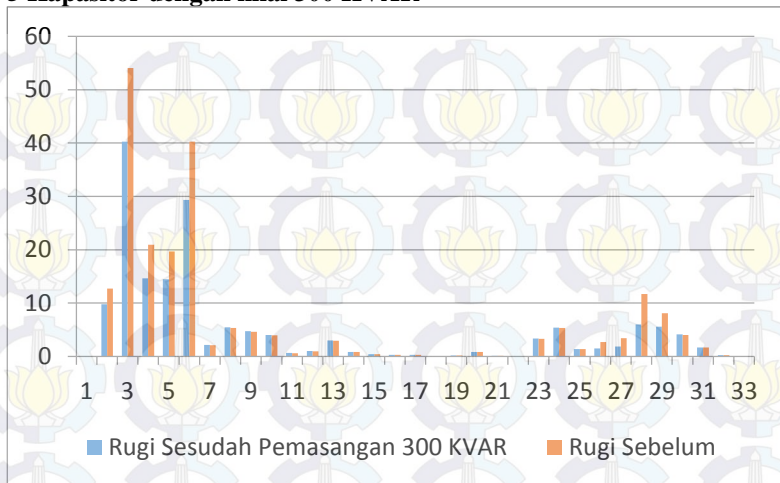
LAMPIRAN 3

Rugi Daya dan Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor

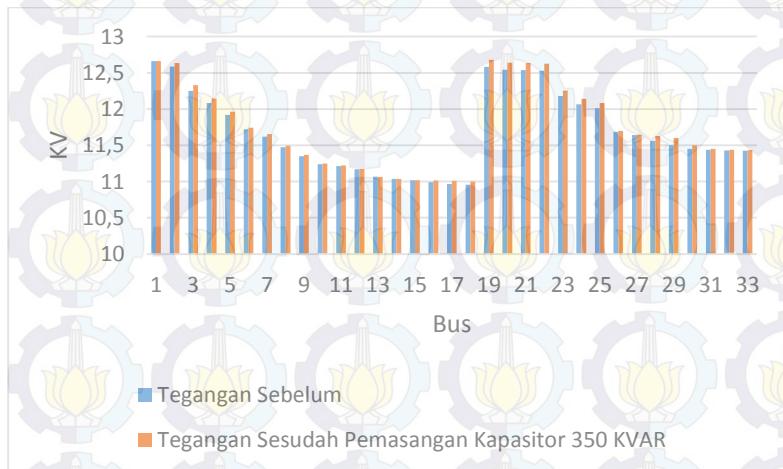
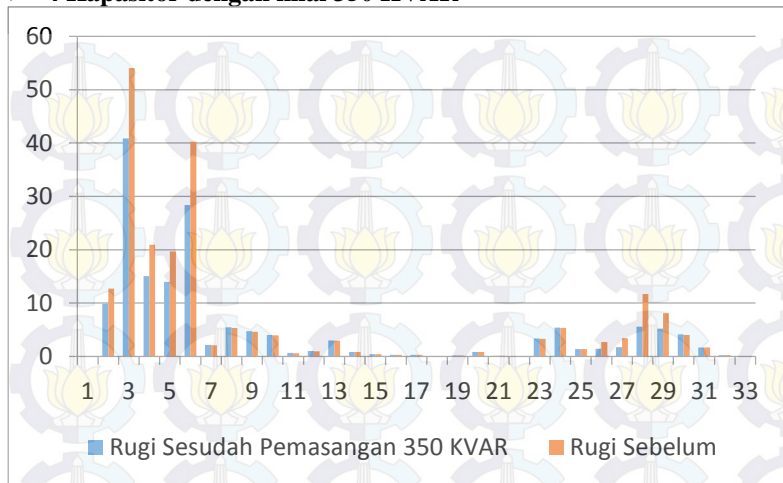
➤ 6 Kapasitor dengan nilai 250 KVAR



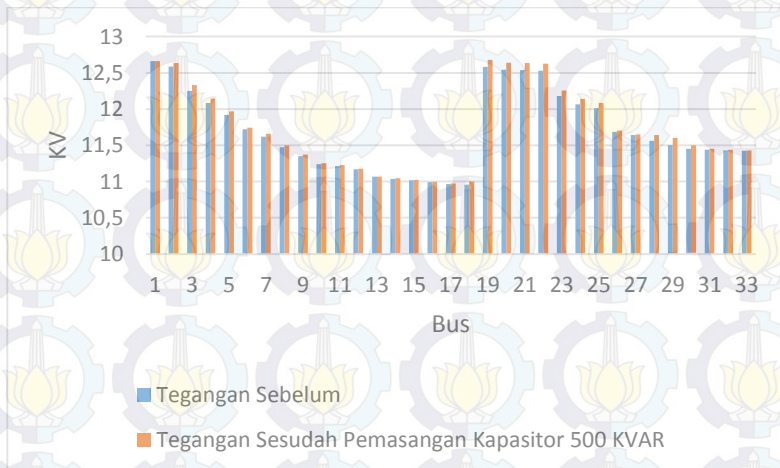
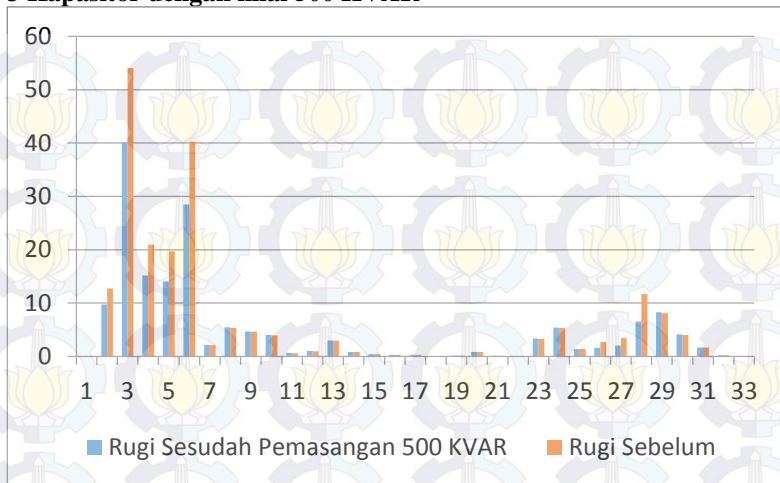
➤ **5 Kapasitor dengan nilai 300 KVAR**



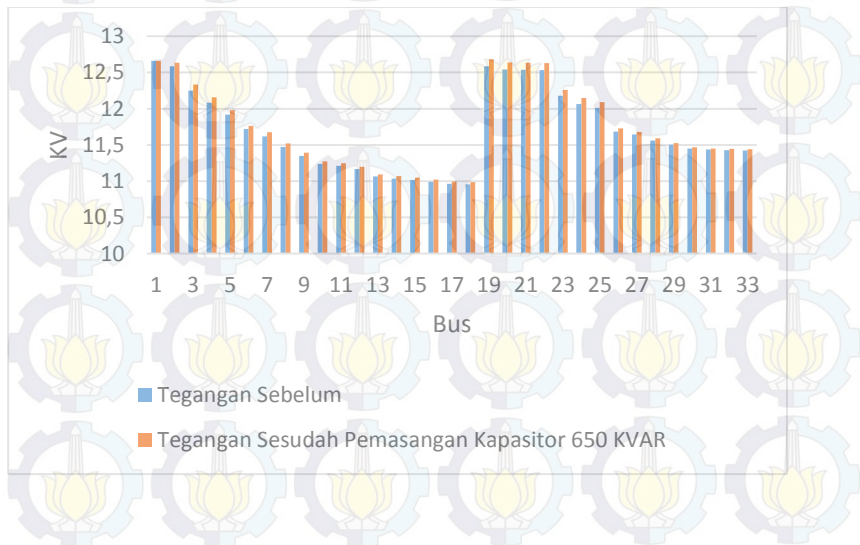
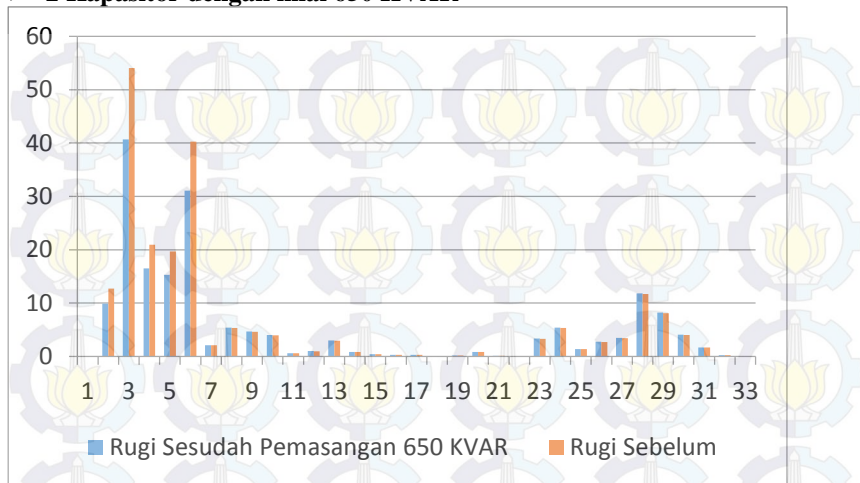
➤ 4 Kapasitor dengan nilai 350 KVAR



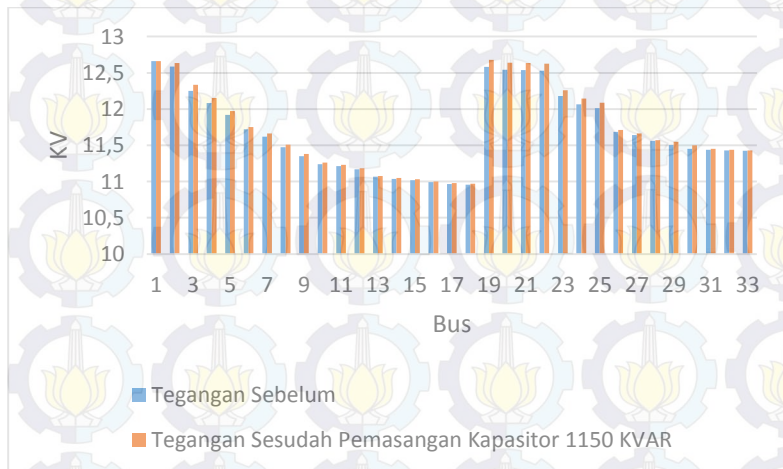
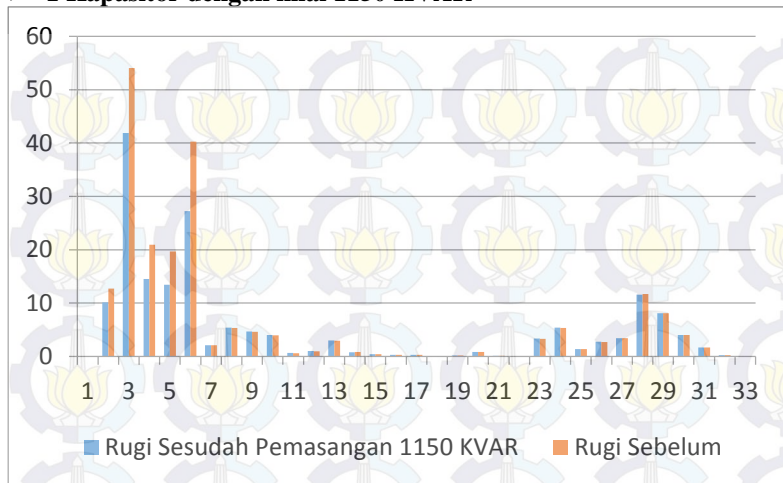
➤ 3 Kapasitor dengan nilai 500 KVAR



➤ 2 Kapasitor dengan nilai 650 KVAR



➤ **1 Kapasitor dengan nilai 1150 KVAR**





Optimal Capacitor Placement and Sizing for Power Loss Reduction Using Combined Power Loss Index-Loss Sensitivity and Direct Search

Irfan Efrizal Rahman
2213 105 060

Supervisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Supervisor II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

Abstract:

Radial Distribution Network is a network that most of developed country used because it is easy on addition of load. But, there are some problem on this radial system including losses, voltage drop, small power factor especially on the longest bus from the source. Capacitor installment on the system can compensate reactive power, increasing voltage level, and power factor. Therefore, installment of capacitor with the right location and size can reduce losses significant with the minimum cost. Power loss index-loss sensitivity method can be use to place capacitor with optimal by giving index on each bus with parameter from load flow result and Direct Search to find optimal size of capacitor with the location of capacitor from Power Loss Index-Loss Sensitivity. The first load flow use to obtain first losses on the network. After the placement and sizing analyze done, reducement of losses obtain by 50.9263 KW with the 4 location and 350 KVAR of capacitor sizing.

Keywords : Losses, Capacitor, Power Loss Index-Loss Sensitivity, Direct Search.



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, dengan segala puji syukur kepada Allah SWT yang memiliki segala apa yang ada di dunia. Dengan segala kerendahan hati, hanya karena limpahan kasih sayang, karunia, petunjuk, dan bimbingan Allah SWT penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul **“Penentuan Lokasi Dan Nilai Optimal Kapasitor Untuk Mengurangi Kerugian Daya Menggunakan Kombinasi *Power Loss Index-Loss Sensitivity Dan Direct Search*”**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan Strata 1 (S1) pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri-Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT atas limpahan ridho, rahmat dan karunia-Nya dan Nabi Muhammad SAW yang telah banyak memberi syafaat.
2. Bapak dan Ibu Penulis, mas Yuyus, mbak Ani, mas Helmi, dan Dita serta seluruh keluarga yang selalu mendukung dan membantu penulis dalam menyelesaikan studi.
3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, PhD dan Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. sebagai dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan dan perhatiannya dalam penyelesaian Tugas Akhir.
4. Dimas Fajar Uman P., ST., MT. yang banyak memberikan dukungan dan bantuan pada penulis selama penyelesaian Tugas Akhir.
5. Teman-teman seperjuangan Final Project, khususnya Novian Umen, Alfian, Samsu, Oyong, RAR, Antok, Nizar, Khakim, Yaqin, Agung, Aris Teman-teman asisten dan trainee Lab. B103, Serta keluarga besar Power LJ gasal 2013.
6. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS.
7. Dan seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu yang telah banyak membantu penulis.

Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2015

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika	3
1.6 Relevansi	4

BAB II SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik	5
2.2 Pengelompokan Jaringan Distribusi	6
2.3 Klasifikasi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik	7
2.4 Jaringan Distribusi Radial Berdasarkan Susunan rangkaianannya	9
2.5 Sistem Tenaga Listrik Tiga Fasa	13
2.6 Analisa Aliran Daya	14
2.7 Metode <i>Forward-Backward Sweep</i>	15
2.8 Kuantitas Per Unit (PU)	17
2.9 Kapasitor Shunt	18

BAB III PERANCANGAN PENEMPATAN DAN NILAI KAPASITOR PADA SISTEM IEEE-33 BUS

3.1 Pengumpulan Data	23
3.2 Analisa Aliran Daya <i>forward-backward Sweep</i>	23
3.3 <i>Power loss Index – Loss Sensitivity</i>	27
3.3.1 <i>Power loss Index</i>	28
3.3.2 <i>Loss Sensitivity</i>	29
3.4 <i>Direct Search Algorithm</i>	30

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Sistem Distribusi IEEE-33 Bus	35
4.2	Analisis Aliran Daya IEEE-33 Bus	35
4.3	Hasil Nilai <i>Power loss Index-Loss sensitivity</i> Pada Sistem IEEE-33 Bus	40
4.3.1	Hasil <i>Power loss index</i>	40
4.3.2	Hasil <i>Loss sensitivity</i>	43
4.3.3	Hasil penentuan lokasi 6 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	45
4.3.4	Hasil penentuan lokasi 5 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	45
4.3.5	Hasil penentuan lokasi 4 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	46
4.3.6	Hasil penentuan lokasi 3 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	46
4.3.7	Hasil penentuan lokasi 2 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	46
4.3.8	Hasil penentuan lokasi 1 buah kapasitor Berdasarkan nilai <i>power loss index- loss sensitivity</i>	46
4.4	Hasil <i>Direct Search Algorithm</i>	47
4.4.1	Pemasangan 6 kapasitor	47
4.4.2	Pemasangan 5 kapasitor	50
4.4.3	Pemasangan 4 kapasitor	53
4.4.4	Pemasangan 3 kapasitor	56
4.4.5	Pemasangan 2 kapasitor	59
4.4.6	Pemasangan 1 kapasitor	62
4.5	Analisa sistem keseluruhan	65

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	67
5.2	Saran	68

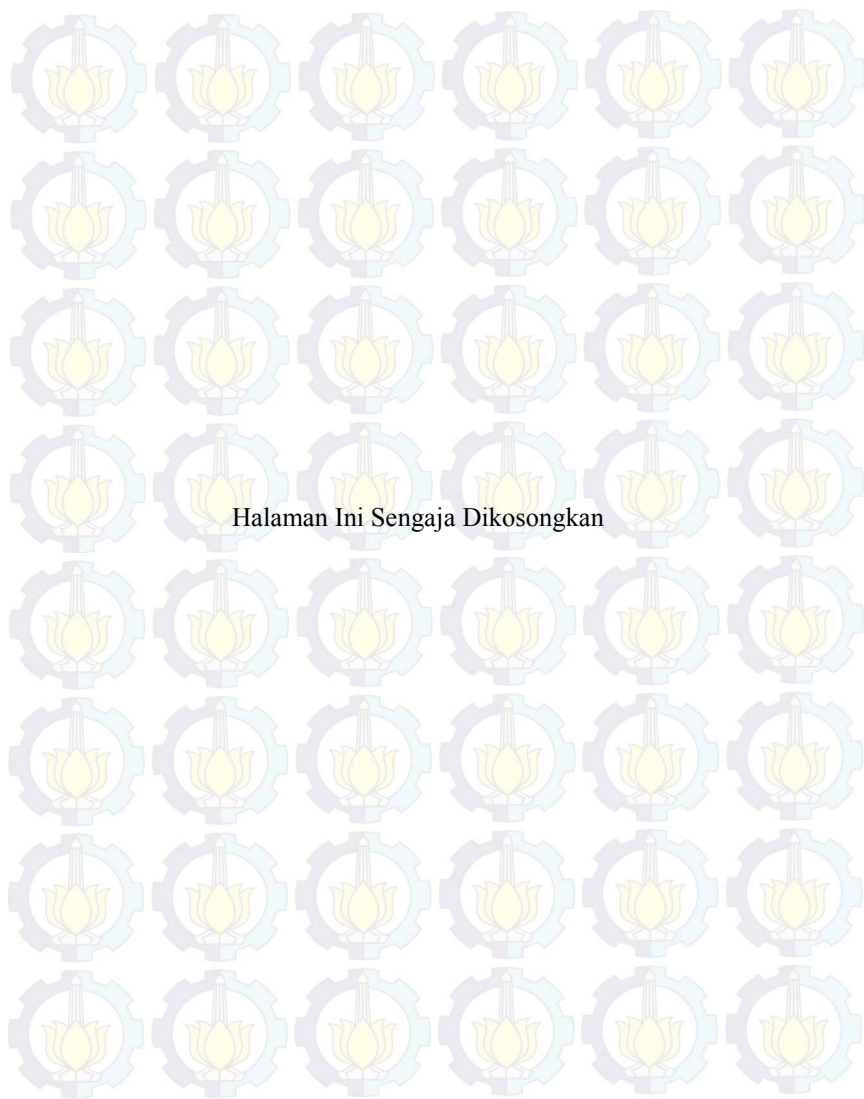
DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIOGRAFI PENULIS

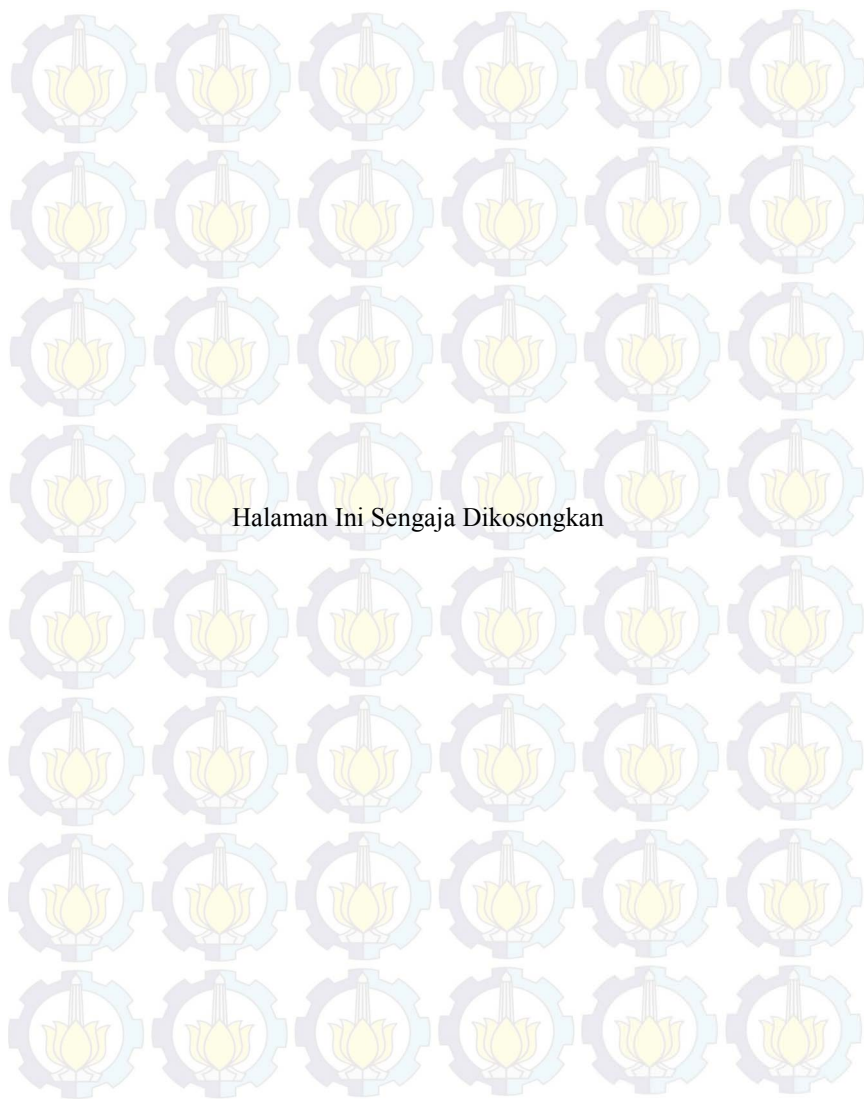
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Keuntungan pemasangan kapasitor	20
Tabel 4.1 Hasil analisa aliran daya sistem IEEE-33 Bus	36
Tabel 4.2 Hasil <i>Power loss index</i> pada IEEE-33 Bus	41
Tabel 4.3 Hasil <i>Loss sensitivity</i> pada IEEE-33 Bus	43
Tabel 4.4 Hasil 6 bus potensial dengan metode <i>Power loss index- Loss sensitivity</i>	45
Tabel 4.5 Daftar Nilai kapasitor	47
Tabel 4.6 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 6 kapasitor	47
Tabel 4.7 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 5 kapasitor	50
Tabel 4.8 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 4 kapasitor	53
Tabel 4.9 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 3 kapasitor	56
Tabel 4.10 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 2 kapasitor	59
Tabel 4.11 Hasil <i>running direct search algorithm</i> dengan 1 kapasitor	62
Tabel 4.6 Hasil F dan rugi pada sistem pada setiap kasus	65



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Single line diagram</i> Sistem tenaga listrik	7
Gambar 2.2 Penyaluran daya listrik	8
Gambar 2.3 Jaringan Distribusi radial tipe pohon	10
Gambar 2.4 Jaringan Distribusi radial tipe tie dan switch	11
Gambar 2.5 Jaringan Distribusi radial tipe pusat beban	12
Gambar 2.6 Jaringan Distribusi radial dengan phase area	13
Gambar 2.7 Skema sistem tenaga listrik	13
Gambar 2.8 <i>Linear Network</i>	15
Gambar 2.9 <i>Non Linear Network</i>	16
Gambar 2.10 Pemasangan Kapasitor pada sistem	19
Gambar 2.11 Lokasi pemasangan kapasitor pada sistem tenaga listrik	20
Gambar 3.1 Blok diagram Sistem	21
Gambar 3.2 <i>Flowchart</i> Sistem	22
Gambar 3.3 <i>Flowchart load flow</i>	24
Gambar 3.4 <i>Single Line diagram</i> contoh analisis menggunakan Metode K-matrik	25
Gambar 3.5 Jaringan dua bus	28
Gambar 3.6 Jaringan distribusi dua bus	29
Gambar 3.7 <i>Flowchart Direct Search algorithm</i>	32
Gambar 4.1 Rugi daya awal sistem	40
Gambar 4.2 Grafik <i>Power loss index</i> pada IEEE-33 Bus	42
Gambar 4.3 Grafik <i>Loss sensitivity</i> pada IEEE-33 Bus	44
Gambar 4.4 Hubungan fungsi objektif dan nilai 6 kapasitor	49
Gambar 4.5 Hubungan rugi daya dan nilai 6 kapasitor	49
Gambar 4.6 Hubungan fungsi objektif dan nilai 5 kapasitor	52
Gambar 4.7 Hubungan rugi daya dan nilai 5 kapasitor	52
Gambar 4.8 Hubungan fungsi objektif dan nilai 4 kapasitor	55
Gambar 4.9 Hubungan rugi daya dan nilai 4 kapasitor	55
Gambar 4.10 Hubungan fungsi objektif dan nilai 3 kapasitor	58
Gambar 4.11 Hubungan rugi daya dan nilai 3 kapasitor	58
Gambar 4.12 Hubungan fungsi objektif dan nilai 2 kapasitor	61
Gambar 4.13 Hubungan rugi daya dan nilai 2 kapasitor	61
Gambar 4.14 Hubungan fungsi objektif dan nilai 1 kapasitor	64
Gambar 4.15 Hubungan rugi daya dan nilai 1 kapasitor	64



BIOGRAFI PENULIS



Irfan Efrizal Rahman atau biasa dipanggil Irfan lahir di Surabaya pada tanggal 11 Oktober 1991. Penulis menempuh Sekolah dasar di SD Muhammadiyah 4 Surabaya selama 6 tahun, kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 6 di Surabaya selama 3 tahun, serta menempuh pendidikan di SMA Muhammadiyah 2 Surabaya selama 3 tahun. Setelah lulus dari SMA, penulis melanjutkan kuliah Program Diploma 3 jurusan Teknik Elektronika di PENS-ITS Surabaya. Setelah menyelesaikan program Diploma 3, saat ini penulis sedang melanjutkan kuliah Program Strata 1 (S1) jurusan Teknik Elektro di ITS Surabaya. Penulis hobi bermain game dan badminton. Penulis dapat dihubungi melalui email ier.fun@gmail.com

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik adalah sistem distribusi. Sistem distribusi memiliki beberapa tipe sistem, salah satunya adalah sistem distribusi jaringan radial. Sistem distribusi jaringan radial merupakan jaringan distribusi yang cukup banyak digunakan di daerah berkembang sehingga lebih mudah dalam hal penambahan beban. Namun, ada beberapa kendala pada sistem distribusi radial ini diantaranya rugi daya yang cukup besar, power faktor yang kecil, dan nilai tegangan yang buruk, khususnya pada jaringan dengan jarak yang cukup jauh dari sumber. Salah satu cara untuk mengatasi masalah tersebut adalah pemasangan kapasitor pada sistem untuk mengkompensasi daya reaktif, mengurangi rugi daya, menaikkan level tegangan dan koreksi power faktor[1].

Tugas akhir ini dibuat untuk menganalisa kondisi sistem pada jaringan distribusi radial dengan melakukan studi aliran daya (*load flow*) sehingga diketahui besar daya dan tegangan setiap bus pada jaringan distribusi dan juga rugi daya pada jaringan distribusi tersebut. Parameter-parameter pada *load flow* akan digunakan pada metode *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search algorithm* untuk dilakukan penempatan dan juga nilai kapasitor pada jaringan distribusi untuk mengurangi kerugian daya pada sistem distribusi.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah tentang Bagaimana menganalisa lokasi penempatan kapasitor berdasarkan metode *power loss index-loss sensitivity* dan juga Bagaimana menganalisa ukuran/nilai optimal kapasitor berdasarkan metode *direct search algorithm*. Adapun batasan tersebut adalah sebagai berikut :

1. Studi aliran daya yang dilakukan adalah sistem distribusi radial pasif tiga fasa seimbang
2. Metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity* digunakan untuk penentuan letak kapasitor dan *Direct Search* digunakan untuk penentuan nilai optimal kapasitor.

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui bus potensial untuk penempatan kapasitor berdasarkan metode *power loss index-loss sensitivity*.
2. Mengetahui ukuran/nilai kapasitor berdasarkan metode *direct search algorithm*.
3. Mengetahui rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor pada jaringan distribusi.

1.4 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam penelitian dan Tugas Akhir ini adalah :

1. Studi Literatur

Penulis mempelajari mengenai dasar teori studi aliran daya, kapasitor pada distribusi, dan pemograman Matlab dari buku literatur, buku tugas akhir, artikel-artikel dari internet dan jurnal IEEE. Untuk mengetahui metode dan karakteristik sebagai acuan dalam penelitian tugas akhir ini.

2. Pembuatan Program

Dalam pembuatan program yaitu menggunakan software Matlab R2009a untuk analisa aliran daya pada sistem yang diuji dan dilakukan analisa dengan metode *Power loss index-loss sensitivity* dan *direct search algorithm*.

3. Pengujian Program dan Analisa Data

Setelah program simulasi sudah selesai, diharapkan hasil simulasi berupa indeks dan nilai kapasitor. Maka penulis dapat menganalisa penempatan dan nilai optimal kapasitor untuk mengurangi kerugian daya pada jaringan distribusi.

4. Penulisan Laporan Tugas Akhir

Sebagai hasil akhir dari penelitian dilakukan penulisan laporan dalam bentuk buku tugas akhir.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan pembacaan data saluran dan beban

Pembacaan data saluran dan beban dilakukan pada jaringan distribusi radial. Data tersebut digunakan sebagai data awal dalam simulasi sebelum adanya penempatan kapasitor.

2. Menganalisa aliran daya

Dari urutan kerja point 1 diatas, dapat dilakukan analisa aliran daya dengan *software* Matlab untuk mendapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk digunakan dalam analisa penempatan dan nilai kapasitor pada jaringan distribusi.

3. Menentukan *Power loss index-Loss sensitivity*

Dari hasil simulasi aliran daya (point 2) akan didapatkan parameter. Parameter tersebut digunakan untuk menghitung nilai *Power loss index-Loss sensitivity* sehingga didapatkan nilai indeks setiap bus.

4. Menentukan penempatan kapasitor

Berdasarkan nilai indeks (point 3) dapat ditentukan lokasi penempatan kapasitor untuk mengurangi kerugian daya sistem berdasarkan indeks terendah yang menandakan bahwa bus tersebut paling tidak stabil.

5. Menentukan nilai kapasitor dengan *direct search algorithm*

Dari point 4 maka akan dilakukan analisa nilai kapasitor optimal pada jaringan distribusi sehingga didapat fungsi objektif minimum.

6. Kesimpulan

Pada urutan kerja terakhir, dilakukan pengambilan kesimpulan dan rekomendasi dari hasil tugas akhir yang dapat digunakan sebagai referensi untuk tugas akhir berikutnya.

1.6 Sistematika

Sistematika dalam penulisan Tugas Akhir ini terbagi atas lima bagian dengan terurai sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai pendahuluan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.

BAB II : SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Bab ini secara garis besar membahas tentang sistem distribusi tenaga listrik, aliran daya, dan kapasitor pada sistem distribusi.

BAB III : PERENCANAN PENEMPATAN DAN NILAI KAPASITOR PADA SISTEM IEEE 33 BUS

Bab ini berisi tentang rancangan sistem dari sistem distribusi radial dan rancangan program *power loss index-loss sensitivity* serta *direct search*

algorithm untuk penentuan lokasi dan nilai dari kapasitor pada jaringan distribusi.

BAB IV : SIMULASI DAN ANALISA DATA

Pada bab ini berisi tentang hasil dari simulasi program *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search algorithm* untuk penentuan lokasi dan nilai kapasitor, serta pengaruh banyaknya kapasitor dan nilai kapasitor terhadap fungsi objektif pada *direct search algorithm*.

BAB V : PENUTUP

Berisikan tentang kesimpulan dan saran dari pengerjaan proyek akhir.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Menjadi acuan untuk menganalisa penentuan lokasi dan nilai kapasitor pada suatu sistem distribusi.
2. Dapat menjadi acuan untuk pemasangan kapasitor dan nilai kapasitor pada bus dengan indeks terlemah.
3. Dapat menjadi referensi atau tolok ukur untuk penelitian tentang studi *optimal capacitor placement and sizing*.
4. Dapat menjadi referensi dalam pengembangan metode *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search algorithm* yang lebih detail.

BAB II

SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah sebagai pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan) dan merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dengan tegangan 11 kV hingga 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan (*step up transformer*) menjadi 70 kV, 154kV, 220kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan tersebut adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya listrik pada saluran transmisi, dimana rugi-rugi daya listrik pada saluran transmisi adalah sebanding dengan arus kuadrat yang mengalir (I^2R). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan semakin kecil. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan kembali menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan (*step down transformer*) pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380V yang selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen atau industri. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Pada sistem penyaluran daya listrik jarak jauh selalu menggunakan tegangan tinggi hingga tegangan ekstra tinggi dengan menggunakan transformator penaik tegangan (*step up transformer*). Nilai tegangan yang sangat tinggi ini (*HV, UHV, EHV*) menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain berbahaya bagi lingkungan dan mahalnyanya perlengkapan. Selain itu nilai tegangan yang dikirim menjadi tidak sama dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban atau sisi

konsumen. Maka pada daerah-daerah pusat beban, tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan transformator penurun tegangan (*step down transformer*). Akibatnya, bila ditinjau dari nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber atau pembangkit hingga di titik beban atau konsumen, terdapat beberapa bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda.

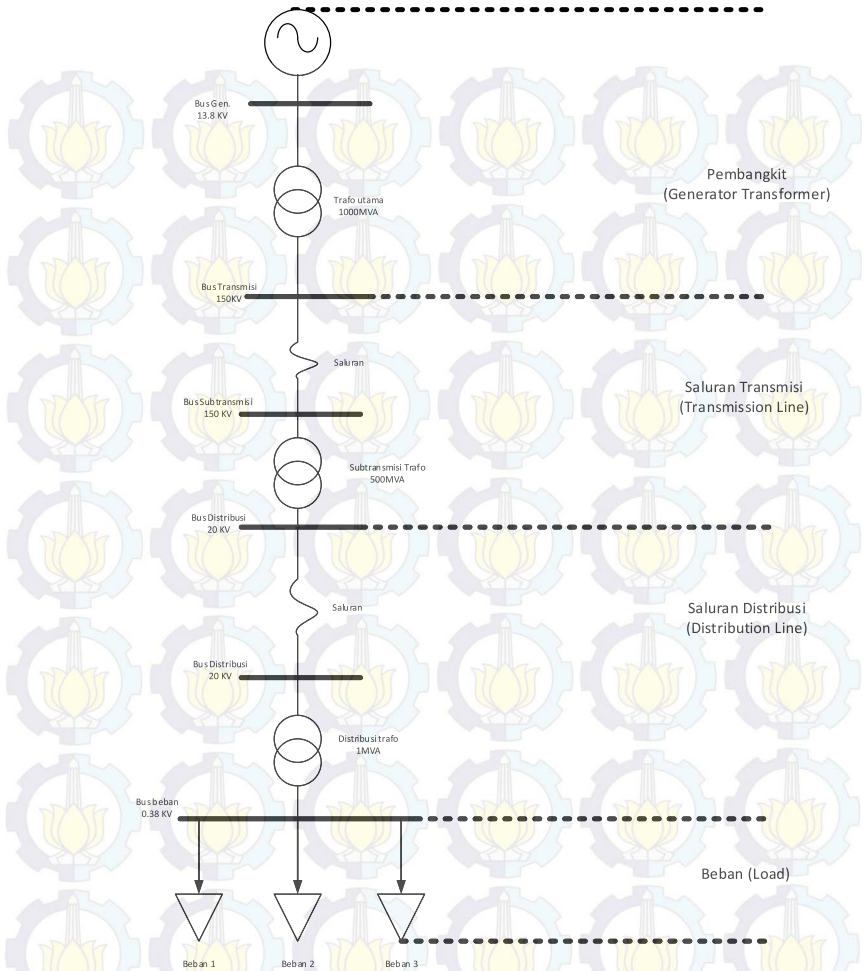
2.2 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Untuk memudahkan dalam penyederhanaan jaringan distribusi tenaga listrik, dilakukan pembagian serta pembatasan daerah sebagai berikut :

- a. Daerah I : Bagian pembangkitan (*Generation*).
- b. Daerah II : Bagian penyaluran (*Transmission*) , bertegangan tinggi (HV,UHV,EHV).
- c. Daerah III : Bagian Distribusi Primer, bertegangan menengah (6 kV hingga 20 kV).
- d. Daerah IV : Instalasi bertegangan rendah 220/380 Volt (Di dalam bangunan pada beban/konsumen).

Berdasarkan pembagian serta pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa Sistem Distribusi adalah Daerah III dan IV yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan dengan beberapa cara sesuai dari segi apa klasifikasi itu dibuat. Dengan demikian ruang lingkup Jaringan Distribusi adalah :

1. SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah)
Terdiri dari tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan kelengkapannya, serta peralatan pengaman dan pemutus.
2. SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah)
Terdiri dari kabel tanah, *indoor* dan *outdoor termination*, batu bata, pasir dan lain-lain.
3. Gardu Transformator
Terdiri dari transformator, tiang, pondasi tiang, rangka tempat trafo, LV (*low voltage*) panel, pipa-pipa pelindung, *Arrester*, kabel-kabel, *transformer band*, peralatan grounding, dan lain-lain.
4. SUTR (Saluran Udara Tegangan Rendah) dan SKTR (Saluran Kabel Tegangan Rendah)
Terdiri dari sama dengan perlengkapan/ material pada SUTM dan SKTM yang membedakan hanya dimensinya.



Gambar 2.1 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik

2.3 Klasifikasi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Secara umum, saluran tenaga listrik atau saluran distribusi dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

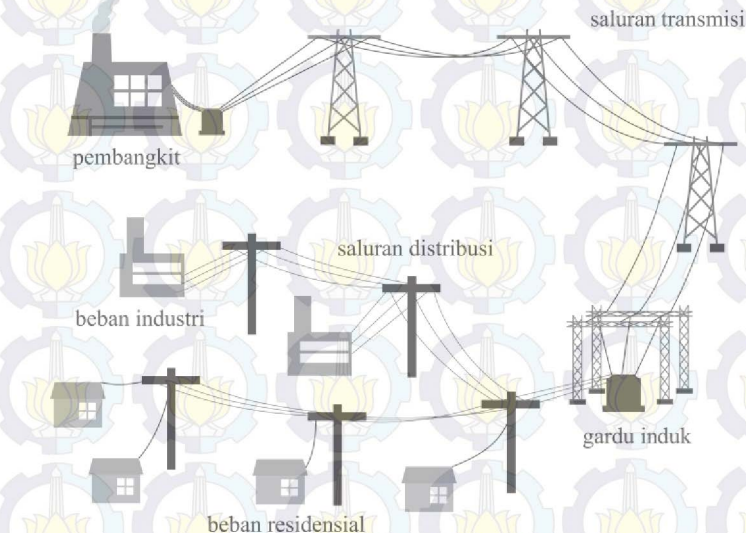
1. Saluran Distribusi Primer

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder trafo *substation* atau Gardu Induk dengan titik primer trafo distribusi dimana saluran ini bertegangan menengah 20kV. Untuk jaringan listrik 70 kV atau 150 kV jika langsung melayani pelanggan bisa disebut jaringan distribusi.

2. Saluran Distribusi Sekunder.

Sistem distribusi sekunder berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan adalah sistem radial. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung dihubungkan ke konsumen/pemakai tenaga listrik dengan melalui peralatan-peralatan sebagai berikut :

- Papan pembagi pada transformator distribusi.
- Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder).
- Saluran Layanan Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai).
- Alat Pembatas dan pengukur daya (kWH meter) serta fuse atau pengaman pada pelanggan.



Gambar 2.2 Penyaluran daya Listrik

Di Indonesia dalam hal ini PT. PLN menggunakan tegangan sistem distribusi 220/380V. Pemakai listrik ini biasanya bergantung kepada Negara pemberi pinjaman atau dalam rangka kerja sama dimana semua peralatan listrik mulai dari pembangkit (generator set) hingga peralatan kerja (motorlistrik) disuplai dari negara pemberi pinjaman atau kerja sama tersebut.

2.4 Jaringan Distribusi Radial Berdasarkan Susunan Rangkaiannya

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi menuju pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan serta kondisi dan situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer dan salah satunya adalah jaringan distribusi radial.

Pada jaringan distribusi radial antara titik sumber dan titik bebannya hanya terdapat satu saluran (*line*), tidak ada alternatif saluran lainnya. Bentuk jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan dalam desain jaringan distribusi. Saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan tersebut, dan bercabang ke titik-titik beban yang dilayani. Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar. Karena kerapatan arus (beban) pada setiap titik sepanjang saluran tidak sama besar, maka luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak harus sama. Sehingga saluran utama (dekat dengan sumber) yang menanggung beban besar, ukuran penampang konduktornya relatif lebih besar dan saluran yang bercabang semakin ke ujung dengan beban yang lebih kecil, ukuran konduktornya menjadi lebih kecil. Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah :

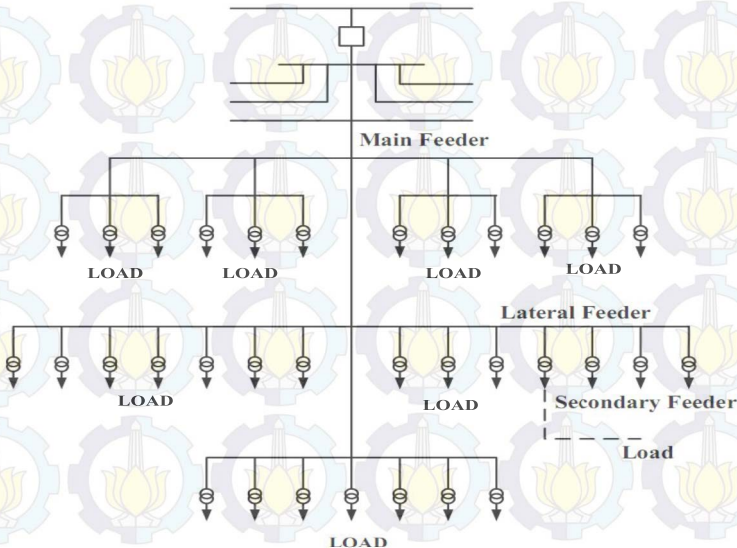
- Kelebihan
 - Bentuk sistemnya lebih sederhana.
 - Biaya investasi relatif murah.
- Kelemahan
 - Kualitas pelayanan daya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.

- Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin, sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami *black out* secara total.

Untuk membatasi gangguan pada jaringan distribusi radial ini dilengkapi dengan peralatan pengaman berupa *fuse*, *sectionalizer*, *recloser*, atau alat pemutus beban lainnya. Tetapi fungsinya hanya membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau di belakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi. Misalnya, gangguan terjadi di titik F, maka daerah beban K, L dan M akan mengalami pemadaman total. Jaringan distribusi radial ini memiliki beberapa bentuk modifikasi, antara lain :

1. Jaringan Distribusi Radial Tipe Pohon

Bentuk jaringan distribusi ini merupakan bentuk yang paling dasar. Satu saluran utama dibentang menurut kebutuhannya, selanjutnya dicabangkan dengan saluran cabang (lateral penyulang) dan lateral penyulang ini bercabang lagi dengan sublateral penyulang (anak cabang).

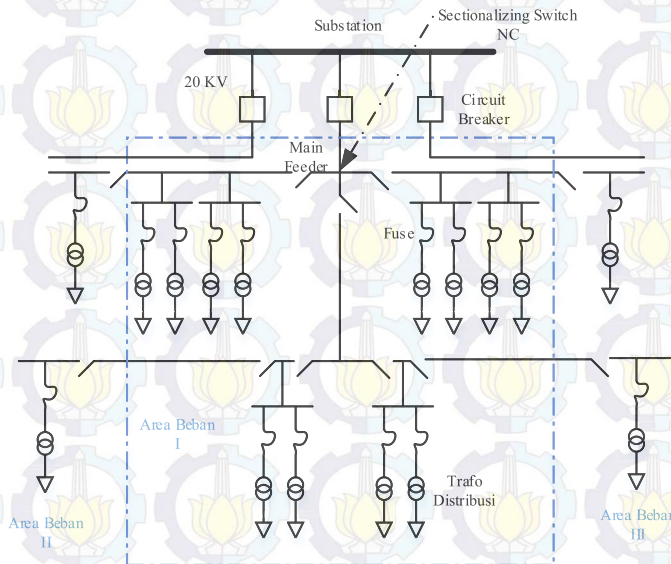


Gambar 2.3 Jaringan distribusi radial tipe pohon^[8]

Arus yang dipikul masing-masing saluran berbeda, arus yang mengalir pada penyulang utama adalah yang terbesar maka penampang konduktor yang digunakan harus yang terbesar, arus pada penyulang lateral yang lebih kecil dari penyulang utama maka ukuran penampang konduktornya lebih kecil dan arus pada sublateral terkecil sehingga ukuran penampang konduktor yang terkecil.

2. Jaringan Distribusi Radial dengan *Tie* dan *Switch* Pemisah

Bentuk ini merupakan modifikasi bentuk dasar dengan adanya penambahan *tie* dan *switch* pemisah, yang digunakan untuk mempercepat pemulihan pelayanan bagi konsumen, dengan cara menghubungkan area yang tidak mengalami gangguan pada penyulang yang mengalami gangguan, dengan penyulang yang tidak mengalami gangguan.



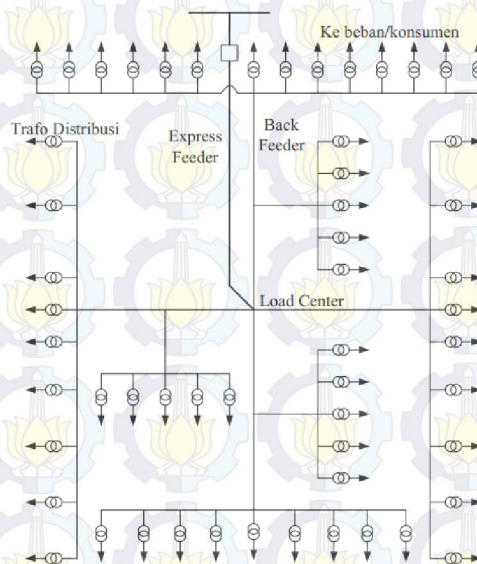
Gambar 2.4 Jaringan distribusi radial tipe tie dan switch^[8]

Dengan demikian bagian penyulang yang mengalami gangguan dapat dilokalisir dan bagian penyulang lainnya yang tidak mengalami gangguan segera dapat dioperasikan kembali dengan cara melepas *switch* yang terhubung ke titik gangguan, dan menghubungkan bagian

penyulang yang tidak mengalami gangguan ke penyulang di sekitarnya.

3. Jaringan Radial Tipe Pusat Beban

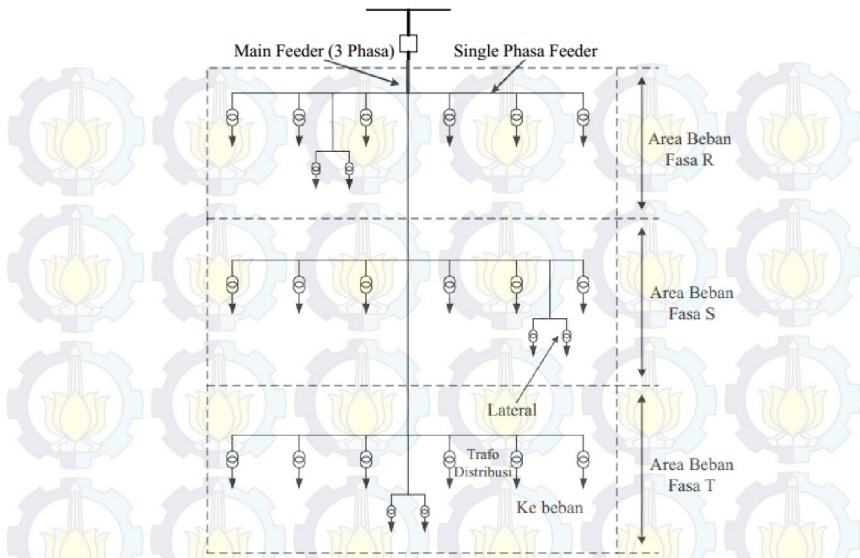
Bentuk ini mensuplai daya dengan menggunakan penyulang utama (*main feeder*) yang disebut "*express feeder*" langsung ke pusat beban, dan dari titik pusat beban ini didistribusikan dengan menggunakan "*back feeder*" secara radial seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Jaringan distribusi radial tipe pusat beban^[8]

4. Jaringan Radial Dengan Phase Area

Pada bentuk ini masing-masing fasa dari jaringan bertugas melayani daerah beban yang berlainan. Bentuk ini akan dapat menimbulkan akibat kondisi sistem 3 fasa yang tidak seimbang (*asimetris*), bila diaplikasikan pada daerah beban yang baru dan belum merata pembagian bebannya. Karena itu jaringan ini cocok untuk daerah yang bebannya stabil dan jika ada penambahan beban maka pembagian bebannya harus dapat diatur merata dan simetris pada setiap fasanya seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Jaringan distribusi radial dengan phase area^[8]

2.5 Sistem Tenaga Listrik Tiga Fasa

Sistem jaringan listrik yang terpasang di Indonesia merupakan jaringan listrik tiga fasa yang disalurkan oleh produsen listrik, dalam hal ini PLN, ke konsumen listrik yakni rumah tangga dan industri. Secara umum sistem tenaga listrik terbagi ke dalam beberapa bagian yakni pembangkitan, penyaluran (transmisi dan distribusi) dan beban. Berikut skema suatu sistem tenaga listrik tiga fasa.



Gambar 2.7 Skema sistem tenaga listrik

Generator akan membangkitkan daya listrik yang akan disalurkan dalam bentuk daya listrik tiga fasa. Pada sistem transmisi dibutuhkan daya yang besar, karena pada sistem transmisi ada kerugian daya yang disebabkan oleh faktor jarak pada saluran. Karena itu, untuk mengurangi

kerugian daya tersebut tegangan akan dinaikkan menggunakan *step-up transformer* menjadi tegangan yang lebih tinggi untuk mengurangi kerugian daya. Agar dapat digunakan oleh konsumen, sebelum didistribusikan, tegangan kembali diturunkan menggunakan *step-down transformer* menjadi 380/220 V. Daya yang diterima oleh konsumen adalah daya listrik arus bolak-balik tiga fasa. Untuk industri daya yang digunakan adalah daya listrik tiga fasa, sedangkan untuk rumah tangga daya yang digunakan adalah daya listrik satu fasa.

2.6 Analisa Aliran Daya

Tujuan utama dari analisis aliran daya adalah untuk mengetahui daya nyata (P) dan daya reaktif (Q) yang mengalir di setiap saluran dengan besar sudut dan fase tegangan pada setiap bus sistem untuk kondisi pembebanan tertentu. Pada umumnya sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua kategori, yaitu Sistem Transmisi dan Sistem Distribusi. Sistem distribusi memiliki beberapa karakteristik diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Sebagian besar menggunakan struktur radial
2. Saluran atau jaringannya tidak bisa dialihkan (*untransposed*)
3. Memiliki bus (*node*) dalam jumlah besar
4. Pembebanan sistem tidak seimbang setiap fasanya
5. Memiliki resistansi (R) dan reaktansi (X) yang tinggi

Karakteristik tersebut perlu diperhitungkan ketika melakukan analisis aliran daya (*load flow*) pada sistem jaringan distribusi. Sistem tersebut harus dianalisis dengan dasar sistem tiga fasa, tidak seperti sistem jaringan transmisi yang dapat dianalisis dengan dasar satu fasa atau fasa tunggal. Dengan alasan tersebut, analisis aliran daya menggunakan *single-phase Newton Raphson* atau *fast decoupled power flow* belum memadai untuk melakukan analisis aliran daya pada sistem jaringan distribusi. Metode yang sering digunakan dalam analisis aliran daya pada sistem jaringan distribusi adalah :

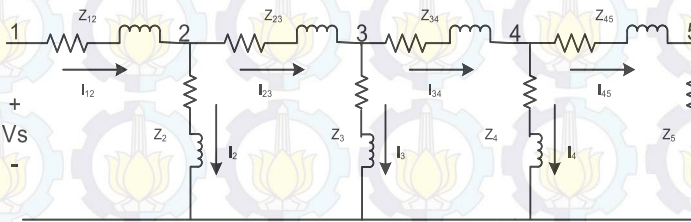
- a. Modifikasi metode Newton Raphson
- b. Metode implisit Z-Bus
- c. Modifikasi metode Gauss-Seidel
- d. Metode *Forward-Backward Sweep*
- e. Metode *Network Topology Based*

Nilai-nilai yang sering muncul dalam perhitungan aliran daya adalah mencakup tegangan, daya aktif, daya reaktif, daya total yang mengalir pada saluran distribusi / antar bus-bus hingga daya aktif dan reaktif yang dihasilkan oleh penyulang. Di bawah ini akan dijelaskan mengenai metode *Forward-Backward Sweep*.

2.7 Metode *Forward-Backward Sweep*

2.7.1 *Linear Network*

Penyulang sistem distribusi memiliki karakteristik *nonlinear* dikarenakan beban diasumsikan memiliki nilai kW dan kvar yang konstan, namun pendekatan untuk karakteristik *nonlinear* merupakan pengembangan dari sistem yang *linear*.



Gambar 2.8 *Linear network*

Gambar 2.8 di atas adalah gambar sistem yang linier dengan mengasumsikan nilai impedansi sudah diketahui dan nilai tegangan sumber sebesar V_s . Perhitungan arus dimulai dari akhir saluran.

$$I_5 = \frac{V_5}{Z_5} \quad (2.1)$$

Maka akan didapatkan nilai I_{45} sama dengan nilai I_5 , kemudian dengan mengaplikasikan hukum Kirchhoff didapatkan tegangan pada titik 4 (V_4).

$$V_4 = V_5 + Z_{45}I_{45} \quad (2.2)$$

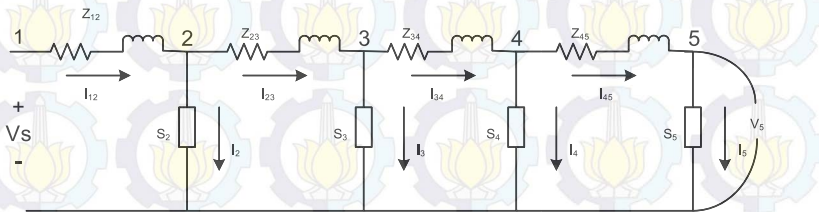
Sehingga nilai I_4 dapat ditentukan

$$I_{34} = I_{45} + I_4 \quad (2.3)$$

Perhitungan di atas dilakukan hingga didapatkan nilai V_1 kemudian dibandingkan dengan nilai V_s . Jika error yang didapat kurang dari toleransi maka analisa dihentikan.

2.7.2 Non-Linear Network

Perhitungan untuk *nonlinear network* adalah modifikasi dari perhitungan untuk *linear network*. Dengan mengganti semua nilai impedansi beban konstan dengan nilai daya kompleks konstan dari beban.



Gambar 2.9 *nonLinear network*

Gambar 2.9 di atas adalah contoh gambar sistem yang tidak linier, perbedaan perhitungan dengan sistem linier terletak pada bagaimana untuk menghitung nilai I_5 .

Dengan mengasumsikan nilai V_5 telah diketahui, maka untuk perhitungan I_5 adalah sebagai berikut :

$$I_5 = \left(\frac{S_5}{V_5} \right)^*$$

Maka akan didapatkan nilai I_{45} sama dengan nilai I_5 , kemudian dengan mengaplikasikan hukum Kirchhoff didapatkan tegangan pada titik 4 (V_4).

$$V_4 = V_5 + Z_{45} I_{45}$$

Sehingga nilai I_4 dapat ditentukan

$$I_{34} = I_{45} + I_4$$

Perhitungan di atas dilakukan hingga didapatkan nilai V_1 kemudian dibandingkan dengan nilai V_s . Jika error yang didapat kurang dari toleransi maka analisa dihentikan.

2.8 Kuantitas Per Unit (PU)

Definisi satuan per unit untuk suatu kuantitas adalah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam bilangan desimal. Atau dengan kata lain satuan per unit merupakan sistem perkalian guna mempermudah kalkulasi atau proses perhitungan dalam analisis jaringan tenaga listrik. Besaran-besaran sistem dalam satuan masing-masing (tegangan dalam volt, arus dalam ampere, dan impedansi dalam ohm), ditransformasikan ke dalam besaran tak berdimensi yaitu per-unit (disingkat pu). Pada awalnya transformasi ke dalam per-unit dimaksudkan untuk mempermudah perhitungan, namun dengan berkembangnya penggunaan komputer menyebabkan tujuan dari penyederhanaan tersebut kurang berarti lagi. Tetapi, beberapa keuntungan yang terkandung dalam satuan per-unit masih dirasakan. Nilai per-unit dari suatu besaran merupakan rasio dari besaran tersebut dengan suatu besaran basis. Besaran basis ini berdimensi sama dengan dimensi besaran aslinya sehingga nilai per-unit besaran itu menjadi tidak berdimensi.

$$\text{Nilai per-unit} = \frac{\text{Nilai sesungguhnya}}{\text{Nilai basis}} \quad (2.7)$$

Nilai sesungguhnya dapat berupa bilangan kompleks, namun nilai basis yang ditetapkan adalah bilangan nyata. Oleh karena itu, sudut fasa nilai dalam per-unit sama dengan sudut fasa sesungguhnya. Sebagai contoh kita ambil daya kompleks sebagai berikut :

$$S = \vec{V} \cdot \vec{I} = V \cdot I \angle (\alpha - \beta) \quad (2.8)$$

Dimana α adalah sudut fasa tegangan dan β adalah sudut fasa arus. Untuk menyatakan S dalam per-unit, ditentukan dulu S basis yang berupa bilangan nyata sehingga :

$$S_{pu} = \frac{S \angle (\alpha - \beta)}{S_{basis}} = S_{pu} \angle (\alpha - \beta) \quad (2.9)$$

Didefinisikan juga bahwa $S_{basis} = V_{basis} \cdot I_{basis}$ dimana nilai S_{basis} dipilih secara bebas dan biasanya dipilih angka yang memberi kemudahan seperti puluhan, ratusan, dan ribuan. Jika S_{basis} sudah ditentukan maka harus memilih salah satu V_{basis} atau I_{basis} untuk ditentukan secara bebas, tetapi tidak keduanya bisa dipilih bebas. Jika S_{pu} dihitung dari persamaan (2.47) akan didapatkan :

$$S_{pu} = \frac{S}{S_{basis}} = \frac{V \angle \alpha \cdot I \angle -\beta}{S_{basis}} = V_{pu} \cdot I_{pu}$$

Nilai basis untuk impedansi ditentukan menggunakan relasi

$$Z_{basis} = \frac{V_{basis}}{I_{basis}} = \frac{V_{basis}^2}{S_{basis}}$$

Dengan Z_{basis} ini relasi arus dan tegangan $V = I \cdot Z$ atau $Z = V/I$ akan didapatkan :

$$\frac{Z}{Z_{basis}} = \frac{V/I}{V_{basis}/I_{basis}}, \text{ atau } Z_{pu} = \frac{V_{pu}}{I_{pu}}$$

Karena $Z = R + jX$ maka,

$$\frac{Z}{Z_{basis}} = \frac{R + jX}{Z_{basis}} \quad (2.13)$$

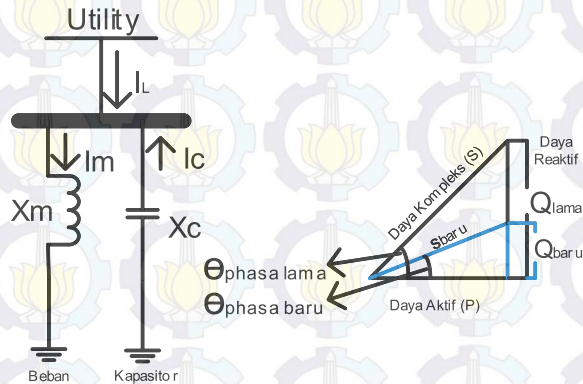
2.9 Kapasitor Shunt

Rugi daya dan *drop* tegangan adalah masalah utama pada jaringan distribusi dimana umumnya radial dan sangat panjang. Tegangan pada jaringan dengan jarak terjauh akan sangat buruk dan diluar dari tegangan yang diinginkan. Sesuai dengan hubungan daya, $P = VI \cos \phi$, jika tegangan turun, maka arus akan menjadi lebih tinggi dibanding saat kondisi tegangan normal dan kondisi tersebut juga akan meningkatkan rugi daya pada jaringan sesuai dengan rumus rugi daya $P = I^2 R$, dimana P (daya aktif), V (Tegangan), I (Arus), dan R (Resistansi).

Untuk mengatasi masalah ini, kapasitor shunt banyak digunakan pada jaringan distribusi. Pemasangan kapasitor kompensator akan meningkatkan nilai tegangan, mengurangi rugi daya, dan meningkatkan penghematan biaya pada jaringan distribusi. Tetapi, untuk mendapat pemasangan yang optimal, maka pemasangan harus sesuai dan juga tepat.

Jika nilai tegangan pada jaringan distribusi menjadi buruk akibat *drop* tegangan, nilai tegangan perlu dijaga dengan menempatkan kapasitor shunt sebagai kompensator daya reaktif. Nilai tegangan yang *drop* ini berakibat pada meningkatnya rugi daya pada jaringan distribusi. Rugi daya pada kabel dan tranformator ada dua jenis: resistif dan reaktif.

Rugi akibat komponen resistif pada beban tidak dapat dihindari. Dan rugi akibat komponen reaktif dapat dihindari. Untuk dapat lebih jelas tentang efek pemasangan kapasitor pada sistem tenaga, ditunjukkan pada gambar 2.10:



Gambar 2.10 pemasangan kapasitor pada sistem

Tanpa pemasangan kapasitor, arus yang mengalir pada saluran, I_L sama dengan arus yang mengalir pada beban I_m . Komponen arus juga terdiri dari komponen riil dan imajiner. Akan tetapi, yang berkontribusi pada rugi daya aktif adalah besaran arus dimana rugi daya berasal dari resistansi saluran dikalikan dengan besar arus saluran yang dikuadrat.

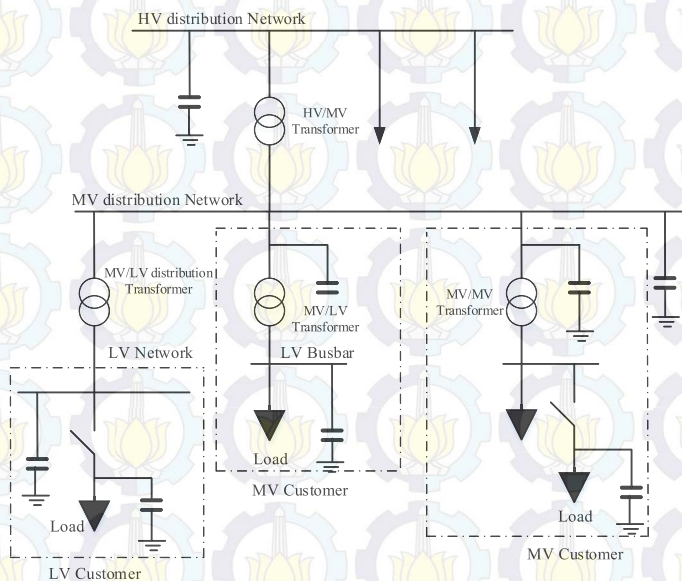
Tetapi dengan pemasangan kapasitor pada sistem, kapasitor shunt ini mensuplai daya reaktif dimana kapasitor menghasilkan arus imajiner murni atau arus reaktif (I_c). Arus reaktif mengurangi komponen imajiner dari arus saluran dimana menghasilkan pengurangan besar arus saluran. Arus saluran yang baru ini mengalir melalui impedansi saluran dan besar drop tegangan berkurang dan power faktor dari sistem meningkat. Pengurangan arus saluran juga rugi daya saluran. Seperti yang digambarkan pada gambar 2.10, hubungan segitiga daya menunjukkan bahwa daya kompleks yang digunakan pada sistem akan berkurang ketika daya reaktif berkurang. Akibat pemasangan kapasitor, total daya reaktif yang dibutuhkan oleh sistem juga berkurang sebesar jumlah kapasitor yang dipasang yang menghasilkan nilai power faktor yang lebih tinggi daripada sebelum adanya pemasangan.

Sedangkan Keuntungan dari penggunaan kapasitor sendiri terbagi menjadi dua, yaitu keuntungan secara ekonomis dan teknis.

Tabel 2.1 Keuntungan Pemasangan Kapasitor

Secara Ekonomis	Secara Teknis
Penurunan biaya listrik yang disebabkan oleh :	Penurunan tegangan drop
Penurunan biaya energi reaktif	Peningkatan daya yang tersedia
Penurunan konsumsi energi aktif dalam KWh (rugi/losses)	Penurunan rugi
	Perbaikan kualitas arus listrik bila digunakan sebagai filter

Sementara untuk pemasangan kapasitor pada jaringan baik transmisi ataupun distribusi adalah:



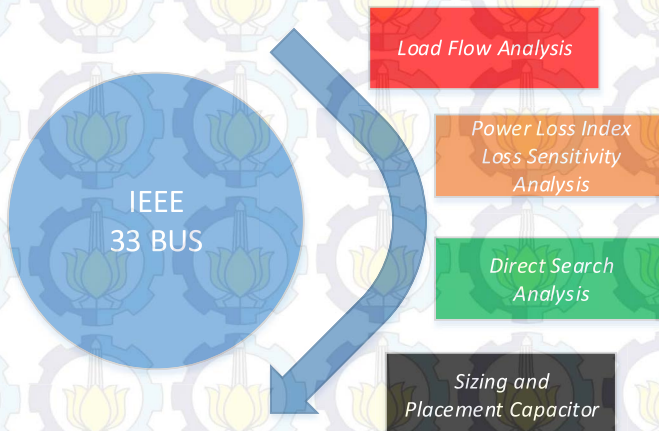
Gambar 2.11 Lokasi Pemasangan kapasitor pada sistem tenaga listrik

1. Kapasitor HV pada jaringan Transmisi HV
2. Kapasitor MV pada jaringan Distribusi MV dan konsumen MV
3. Kapasitor LV pada konsumen MV
4. Kapasitor LV/MV pada kompensasi individual

BAB III

PERANCANGAN PENEMPATAN DAN NILAI KAPASITOR PADA SISTEM IEEE 33 BUS

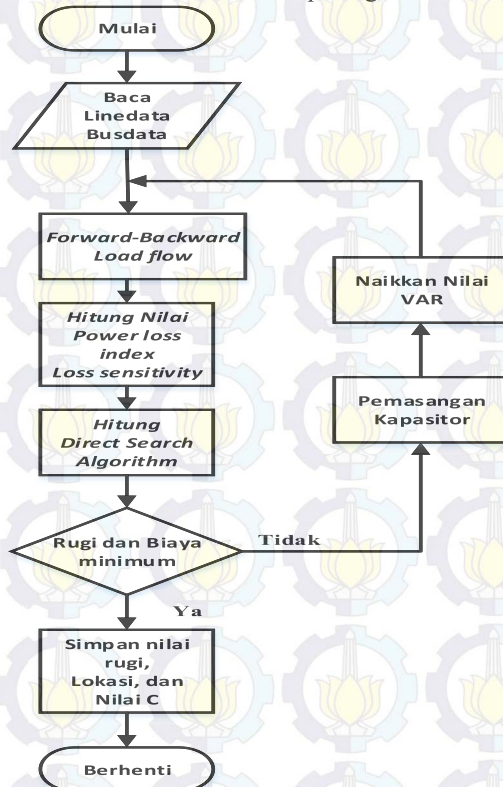
Pada bab III ini akan dijelaskan tentang pengaplikasian dari metode *Power loss Index-Loss Sensitivity* dan *Direct Search Algorithm* pada penentuan lokasi dan nilai dari kapasitor untuk mengurangi kerugian daya. Untuk pengolahan dan simulasi data digunakan software bantu berupa MATLAB. Sistem yang digunakan dalam pengerjaan proyek akhir ini adalah sistem IEEE 33bus dengan base tegangan 12.66 KV.



Gambar 3.1 Blok diagram sistem

Pada tugas akhir ini digunakan kombinasi *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search* sebagai fungsi untuk menentukan lokasi dan nilai dari kapasitor sehingga diharapkan didapatkan pengurangan rugi daya. Langkah-langkah dalam perancangan sistem dan program untuk mendapatkan data yang akan dianalisa adalah pengumpulan data, simulasi *load flow* dengan metode *forward-backward*, penentuan lokasi penempatan kapasitor menggunakan metode *power loss index-loss sensitivity*, dan menentukan nilai kapasitor yang dipasang menggunakan metode *direct search*.

Dengan penggunaan metode ini, diharapkan dengan meletakkan kapasitor dengan nilai yang sesuai dapat menurunkan rugi daya dengan biaya optimal sesuai fungsi objektif pada keseluruhan sistem. Untuk *flowchart* sistem secara keseluruhan ada pada gambar 3.2 dibawah:



Gambar 3.2 *flowchart* sistem

Dari *flowchart* diatas menunjukkan langkah kerja dari sistem yang akan dikerjakan dimulai dari pembacaan data hingga didapatkan lokasi dan nilai optimal kapasitor pada sistem.

3.1 Pengumpulan Data

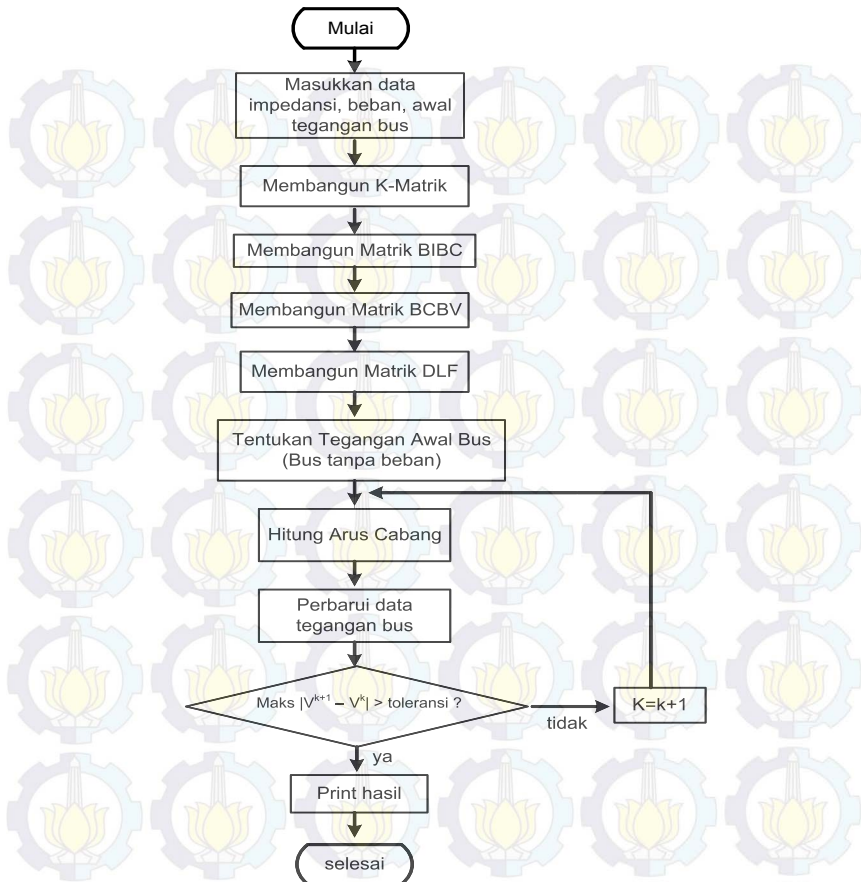
Data yang digunakan dalam tugas akhir adalah data jaringan sistem distribusi IEEE 33 bus . data tersebut akan digunakan dalam analisis aliran daya, *power loss index-loss sensitivity* dan *direct search* sehingga dapat diketahui bus terlemah yang nantinya akan dipasang kapasitor. Sehingga dapat dilakukan perbaikan untuk mengurangi kerugian daya dengan pemasangan kapasitor dengan ukuran yang juga optimal. Berikut data sistem distribusi IEEE 33 Bus pada lampiran 1.

3.2 Analisa Aliran Daya *forward-backward sweep*

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem penyaluran daya listrik yang langsung terhubung dengan beban. Distribusi daya listrik dari gardu induk transmisi menuju tiap-tiap titik beban disalurkan melalui penghantar yang biasa disebut dengan penyulang (*feeder*). Setiap penyulang didesain sedemikian rupa agar dapat menyalurkan daya dengan efektif dan ekonomis. Sehingga rugi-rugi yang terjadi pada saluran dapat ditekan, serta dengan mekanisme konfigurasi tertentu dapat meningkatkan keandalan sistem.

Sistem distribusi memiliki parameter yang kompleks untuk dianalisis. Salah satu hal yang membuat analisis menjadi kompleks adalah karena sistem distribusi merupakan bagian dari sistem penyaluran daya yang paling dekat dengan beban dan memiliki jumlah node yang banyak serta memiliki jalur yang cukup rumit.

Dalam perkembangan analisis aliran daya pada sistem distribusi menggunakan metode forward-backward, terdapat beberapa pengembangan yang telah dilakukan untuk menambah kekakuratan, kemudahan dan kecepatan perhitungan analisis. Terutama untuk dapat mengakomodir sistem tiga fasa dalam keadaan tidak seimbang, maka perlu adanya rekayasa perhitungan secara matematik menggunakan beberapa cara kalkulasi dan pemodelan sistem.

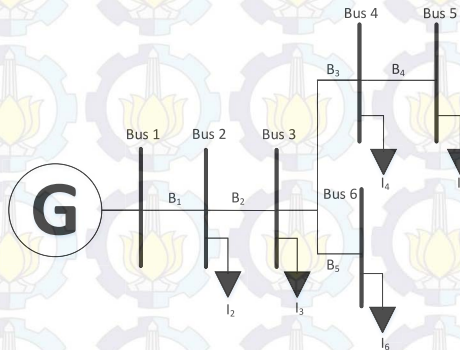


Gambar 3.3 Flowchart load flow

Analisis aliran daya pada sistem distribusi menggunakan metode forward-backward memiliki keefektifan dalam menghitung nilai tegangan pada tiap bus. Namun, apabila diterapkan dalam sistem yang kompleks dan rumit dibutuhkan metode pengembangan lebih lanjut. Metode K-matrik merupakan metode pembentukan matrik impedansi dengan melakukan penelusuran alur/path saluran distribusi. Jalur saluran distribusi direpresentasikan dalam sebuah matrik yang menunjukkan arah arus injeksi dari suatu bus ke bus yang lain. Gambar 3.4 adalah

contoh single line diagram yang akan dianalisa aliran dayanya. Untuk membentuk K-matrik digunakan aturan penelusuran jalur sebagai berikut:

1. $k_{ij} = 1$, jika cabang i berada pada jalur antara bus j dan bus referensi dan memiliki arah yang sama
2. $k_{ij} = -1$, jika cabang i berada pada jalur antara bus j dan bus referensi dan memiliki arah yang berlawanan
3. $k_{ij} = 0$, jika cabang i tidak berada pada jalur antara bus j dan bus referensi



Gambar 3.4 Single Line Diagram Contoh Analisis Menggunakan Metode K-Matrik

Maka untuk contoh single line diagram di atas, K-matrik-nya adalah ditunjukkan pada persamaan sebagai berikut:

$$\begin{array}{c}
 B_1 \\
 B_2 \\
 B_3 \\
 B_4 \\
 B_5
 \end{array}
 \begin{array}{ccccc}
 \text{bus2} & \text{bus3} & \text{bus4} & \text{bus5} & \text{bus6} \\
 \left[\begin{array}{ccccc}
 -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\
 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\
 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Sebuah sistem distribusi sederhana dengan model rangkaian radial murni disuplai dari satu sumber pada infinite bus menyuplai beban yang tersebar dengan jalur tertentu. Maka didapatkan persamaan sederhana sebagai berikut :

$$B_5 = I_6 \quad (3.1a)$$

$$B_4 = I_5 \quad (3.1b)$$

$$B_3 = I_4 + I_5 \quad (3.1c)$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (3.1d)$$

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (3.1e)$$

Persamaan injeksi arus ke bus di atas dapat diringkas perhitungan selanjutnya dengan menggunakan matrik.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Persamaan matrik di atas dapat dirumuskan menjadi model persamaan dengan komponen matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*).

$$[B] = [BIBC][I] \quad (3.2)$$

Kemudian dibentuk persamaan untuk mencari nilai drop tegangan berdasarkan jalur injeksi arusnya.

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \quad (3.3a)$$

$$V_3 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \quad (3.3b)$$

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \quad (3.3c)$$

$$V_5 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \quad (3.3d)$$

$$V_6 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26} \quad (3.3e)$$

Maka drop tegangan dapat dihitung menjadi sebagai berikut :

$$V_1 - V_2 = B_1 \cdot Z_{12} \quad (3.4a)$$

$$V_1 - V_3 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \quad (3.4b)$$

$$V_1 - V_4 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \quad (3.4c)$$

$$V_1 - V_5 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \quad (3.4d)$$

$$V_1 - V_6 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26} \quad (3.4e)$$

Persamaan di atas dapat dibentuk dan diselesaikan menggunakan suatu bentuk matrik dengan komponen matrik BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*).

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (3.5)$$

Sehingga, untuk mendapatkan nilai ΔV didapatkan persamaan akhir sebagai berikut :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (3.6)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Apabila kita amati bentuk dan komposisi dari matrik BIBC, terdapat persamaan komposisi matrik. Matrik BIBC memiliki komponen yang nilainya berlawanan dengan setiap komponen K-matrik. Sehingga dapat dirumuskan hubungan antara K-matrik dan BIBC sebagai berikut ;

$$[BIBC] = -[K - \text{matrik}] \quad (3.8)$$

Sedangkan bila matrik BIBC kita transpose komposisinya maka akan terbentuk matrik yang berkorelasi dengan matrik BCBV.

$$BIBC' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Apabila matrik BIBC' dikalikan per komponen (perkalian dot) dengan matrik impedansi full branch, maka akan didapatkan matrik BCBV.

$$BCBV = -[K - \text{matrik}]' \cdot [ZF_{BR}] \quad (3.9)$$

$$BCBV = - \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}' \cdot \begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \end{bmatrix}$$

Sehingga, untuk metode K-matrik dapat disimpulkan formula mencari drop tegangan di tiap saluran.

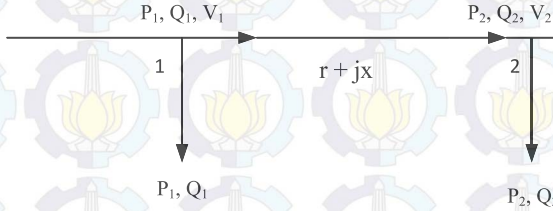
$$[\Delta V] = -[K] \times -[K]' \cdot [ZF_{BR}] \times [I] \quad (3.10)$$

3.3 Power Loss Index – Loss Sensitivity

Untuk dapat menentukan lokasi penempatan kapasitor pada jaringan distribusi maka, pendekatan berbasis *power loss index* dan *loss sensitivity* digunakan

3.3.1. Power Loss Index

Power loss index merupakan metode berdasarkan persamaan aliran daya. Formulasi matematis dari *Power loss index* (PLI) diturunkan dari persamaan tegangan dari dua jaringan bus seperti gambar 3.5.



Gambar 3.5 Jaringan dua Bus

Misalkan sebuah saluran menghubungkan dua bus (1 dan 2), dimana P_1 dan Q_1 adalah daya yang diinjeksikan ke dalam saluran.

Dari sistem sederhana dua bus dapat diturunkan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$|I_1|^2 = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \quad (3.11a)$$

$$|I_1|^2 = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_1^2} \quad (3.11b)$$

$$P_2 = P_1 - P_{loss} \quad (3.12a)$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_{loss} \quad (3.12b)$$

$$P_{loss} = \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) r_1 \quad (3.13a)$$

$$Q_{loss} = \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) X_1 \quad (3.13b)$$

Dari persamaan (3.12a), (3.12b), (3.13a), dan (3.13c) dapat disubstitusikan ke persamaan (3.11b) sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$|I_1|^2 = \frac{\left[P_2 + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) r_1 \right]^2 + \left[Q_2 + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) X_1 \right]^2}{V_1^2} \quad (3.14)$$

Dan mensubstitusikan sisi kiri persamaan (3.14) dengan persamaan (3.11a) yang menjadi

$$V_1^2 = V_2^2 + 2(P_2 r_1 + Q_2 x_1) + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) (r_1^2 + x_1^2) \quad (3.15)$$

Membentuk persamaan kuadrat dalam V_2^2

$$V_2^4 + V_2^2[2(P_2r_1 + Q_2x_1) - V_1^2] + (P_2^2 + Q_2^2)(r_1^2 + x_1^2) = 0 \quad (3.16)$$

Dari persamaan kuadrat V_2^2 dan akan memiliki akar-akar positif jika $b^2 - 4ac \geq 0$, sehingga didapatkan persamaan (3.17)

$$8P_2Q_2r_1x_1 - 4V_1^2(P_2r_1 + Q_2x_1) + V_1^4 - 4(P_2^2x_1^2 + Q_2^2r_1^2) \leq 1 \quad (3.17)$$

Sehingga persamaan *power loss index* adalah:

$$\frac{4[V_1^2(P_2r_1 + Q_2x_1) + (P_2x_1 - Q_2r_1)^2]}{V_1^4} \leq 1 \quad (3.18)$$

Nilai PLI memiliki skala mulai dari 1 sampai dengan 0. Dimana nilai 1 sebagai nilai PLI tertinggi dan 0 sebagai nilai PLI terendah.

3.3.2. Loss Sensitivity

Loss sensitivity factor (LSF) dihitung untuk digunakan menentukan lokasi kandidat untuk penempatan kapasitor. Estimasi dari kandidat bus ini mengurangi pencarian untuk prosedur optimasi.



Gambar 3.6 Jaringan Distribusi dua bus

Jika sebuah jaringan distribusi dengan impedansi Z_{ij} dan sebuah beban P_j, Q_j terhubung antara bus I dan bus J seperti pada gambar 3.6.

Koefisien *loss sensitivity* menjadi berguna pada penempatan kapasitor[1]. Koefisien *loss sensitivity* adalah penurunan dari rugi daya aktif dibanding dengan daya reaktif, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_j} = \frac{2Q_j * R_{ij}}{V_j^2} \quad (3.19a)$$

$$\frac{\partial Q_L}{\partial Q_j} = \frac{2Q_j * X_{ij}}{V_j^2} \quad (3.19b)$$

Dimana faktor *loss sensitivity* merupakan $\left(\frac{\partial P_L}{\partial Q_L}\right)$ digunakan untuk menentukan lokasi potensial dari kapasitor dengan nilai antara 0 sampai dengan 1.

3.4 Direct Search Algorithm

Algoritma *Direct search* digunakan untuk mendapatkan lokasi dan nilai kapasitor yang sesuai yang menghasilkan penurunan rugi daya dan penghematan minimum tanpa mempertimbangkan harmonisa akan didapatkan. Pada penempatan kapasitor, batasan integer nonlinier dengan variabel diskrit menjadi masalah optimasi. Oleh karena itu penggunaan *PLI-LS* digunakan meminimasi pencarian pada optimasi. Fungsi objektif dari *direct search* terdiri dari total biaya rugi daya yang dapat dikompensasi akibat pemasangan beberapa kapasitor pada sistem. Pada sub bab berikut akan dijelaskan setiap bagian untuk membangun algoritma *direct search* untuk nilai optimal kapasitor.

3.4.1. Fungsi Objektif

Fungsi objektif didapatkan untuk mencari biaya minimum dari hubungan antara rugi daya dan kompensasi daya reaktif dari pemasangan kapasitor. *Direct search algorithm* bertujuan untuk mendapatkan penurunan rugi daya dengan nilai kapasitor yang optimal. Untuk mendapatkan penghematan yang sesuai, fungsi objektif *direct search* dirumuskan[3]:

$$F = K_p P_{loss} + \sum_{i=1}^{ncap} K_{ci} Q_{ci} \quad (3.20)$$

Dimana,

K_p = Biaya rugi daya aktif per unit (US\$/KW/tahun)

K_{ci} = Biaya Kapasitor per KVAR (US\$/KVAR)

Q_{ci} = Daya reaktif yang diinjeksikan pada i-bus (KVAR)

N_{cap} = Total unit yang dipasang daya reaktif

P_{losses} = Total rugi daya (KW)

Biaya dari rugi daya diasumsikan bernilai 168 US\$/KW/tahun [5]. Biaya ini berasal dari hubungan antara biaya energi (*energy cost*), waktu bekerja (*utilization time*) untuk rugi per tahun dan faktor

kapasitas (*capacity factor*) dari tipe generator. Diasumsikan tipe generator adalah gas bumi (Eajal and Hawary, 2010), dimana faktor kapasitas dari generator tersebut sekitar 32%. Generator diasumsikan bekerja 24 jam per hari dalam setahun. Sementara untuk biaya kapasitor diasumsikan 3 US\$/kVAR[3]. Persamaan dibawah akan menjelaskan hubungan dari setiap parameter untuk mendapatkan biaya rugi:

$K_p = \text{energy cost} \times \text{utilization time (annual)} \times \text{capacity factor}$

$K_p = (0.06 \text{ US\$/KWh}) \times (8760 \text{ h}) \times (0.32) = 168.2 \text{ US\$/KWh per year}$

Dimana,

Rata-rata biaya energi = 0.06 US\$/KWh [6]

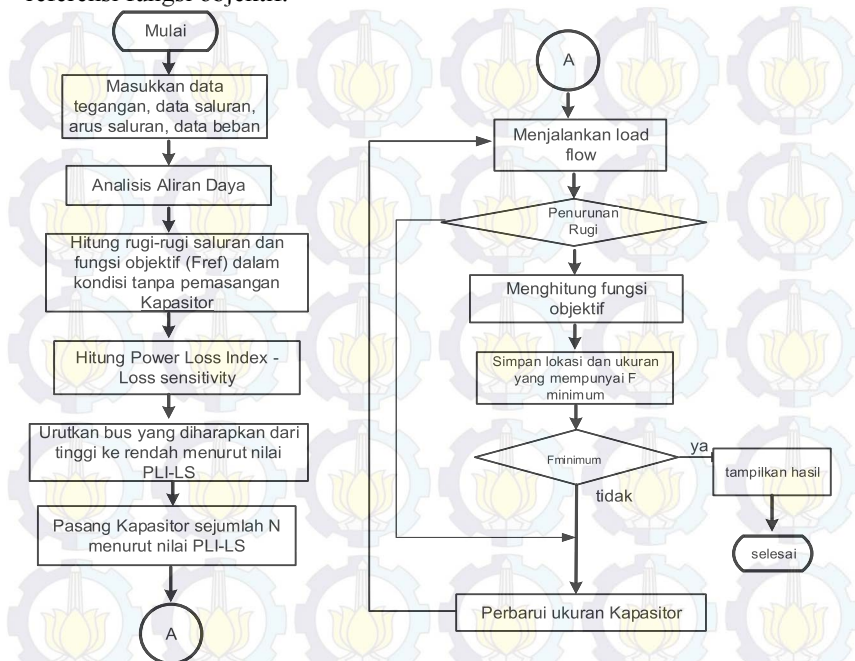
Faktor kapasitas dari tipe pembangkit gas alam dengan pembakaran konvensional = 30-35%[9].

Direct Search algorithm menganalisa dan memilih nilai kapasitor pada bus tertentu dan mendapatkan penghematan optimal pada sistem. Prosedur dari *Direct Search Algorithm* ditunjukkan pada *flowchart* dibawah ini:

Dan untuk langkah-langkah yang dilakukan pada *Direct Search* adalah sebagai berikut:

- Sebagai inisialisasi data, DSA membutuhkan inisialisasi data seperti tegangan bus, impedansi saluran, dan daya beban untuk setiap bus.
- Data tersebut digunakan untuk analisa aliran daya. Setelah itu menghitung fungsi objektif sebelum pemasangan kapasitor dan nilai tersebut sebagai referensi untuk proses nilai kapasitor selanjutnya.
- Dengan hasil dari aliran daya, hitung nilai PLI-LS dan urutkan bus mulai dari tinggi-rendah. Bus yang memiliki nilai PLI-LS akan diprioritaskan karena PLI-LS mengidentifikasi bus yang menyumbang daya reaktif terbanyak.
- Tentukan berapa banyak lokasi yang dipasang kapasitor, setelah itu aliran daya dilakukan untuk menghitung rugi daya setelah pemasangan kapasitor.
- Lalu, hitung hitung fungsi objektif. Dapatkan fungsi objektif minimum dan simpan lokasi dan nilai kapasitor yang mendapat fungsi objektif minimum.
- Karena ada beberapa pilihan nilai kapasitor, jalankan *load flow* untuk setiap nilai kapasitor dengan bus kandidat, simpan hasil setiap nilai kapasitor.
- Hitung kembali fungsi objektif, dan simpan hasil.

Dapatkan biaya terendah dari perhitungan sebelumnya. Perbarui referensi fungsi objektif.



Gambar 3.7 Flowchart Direct Search Algorithm

Dan dalam pemasangan kapasitor, kita juga dapat menghitung apakah dengan pemasangan kapasitor dapat menghasilkan keuntungan atau kerugian dalam pemasangannya dengan menggunakan persamaan[7]:

$$C_t = (\Delta P_{loss} * K_e * 8760 * 10^{-3}) - (PC + IC) \quad (3.21a)$$

Dimana:

$$PC = \sum_{i=1}^{N_{cap}} Kp \quad (3.21b)$$

$$IC = \sum_{i=1}^{N_{cap}} Ki \quad (3.21c)$$

$$\Delta P_{loss} = \frac{P_{loss}(Before\ Installation)}{P_{loss}(after\ Installation)} \quad (3.21d)$$

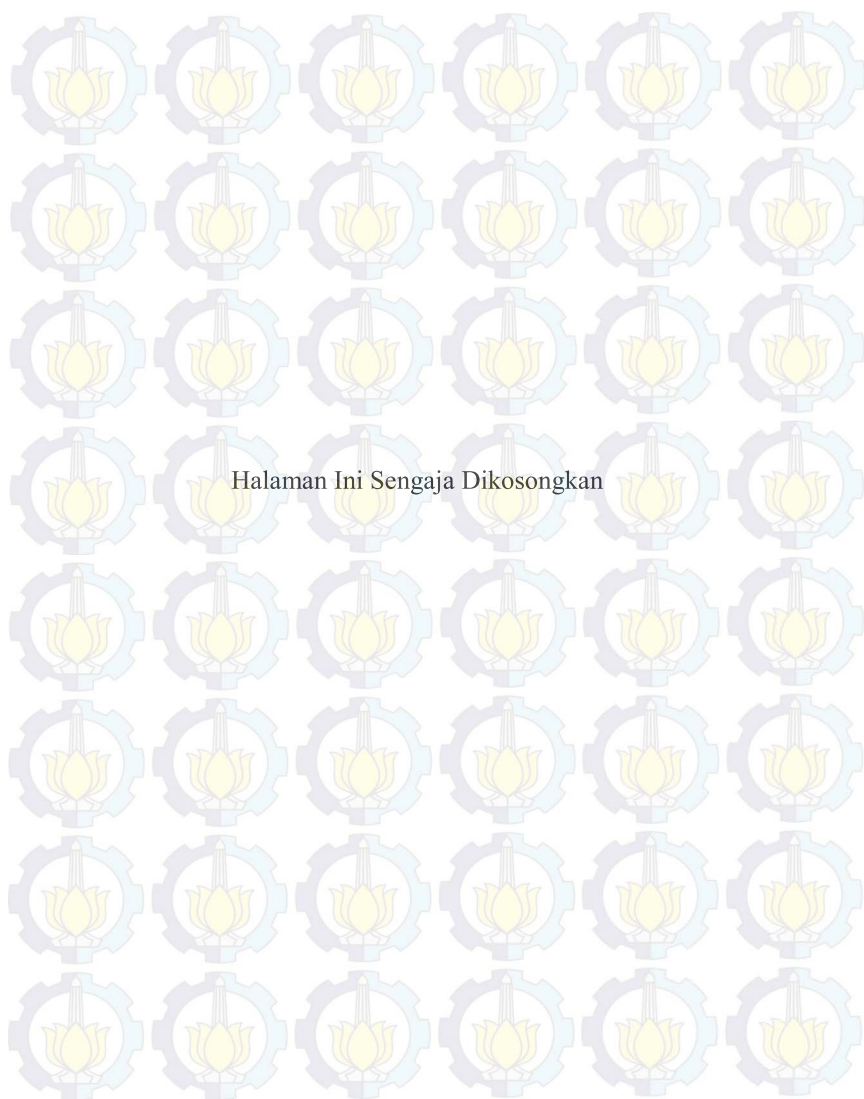
Ke=1.136 \$/KWh

Ki=7500 US\$ (Biaya pemasangan kapasitor per unit)

Kp=5000 US\$ (Biaya pembelian kapasitor per unit)

Asumsi usia kapasitor pada sistem distribusi adalah 10 tahun.

Dengan menggunakan persamaan 3.21a, maka dapat dihitung apakah dengan pemasangan kapasitor dengan nilai tertentu didapatkan keuntungan atau kerugian dalam pemasangannya.



BAB IV

SIMULASI DAN ANALISA DATA

Dalam bab ini membahas tentang hasil simulasi dan juga analisis data yang didapat yang berhubungan tentang kerugian daya berdasarkan studi aliran daya pada sistem IEEE 33Bus. Simulasi dilakukan untuk diolah dengan metode *Power loss Index* dan *loss sensitivity* sehingga diperoleh indeks pada setiap bus. Dari ranking tersebut dapat diketahui bus yang menyumbang daya reaktif terbesar (mendekati 1) sehingga dapat dilakukan pemasangan kapasitor untuk mengurangi kerugian daya dan juga penghematan minimum. Dan juga dilakukan dengan melihat rugi daya yang terjadi pada setiap bus.

4.1 Sistem Distribusi IEEE-33 Bus

Pada sistem IEEE-33 bus digunakan dalam analisa dan simulasi. sistem ini memiliki *base MVA* : 100MVA dan tegangan *line to line* adalah 12.66 KV. Sistem dengan 33 bus dengan konfigurasi sistem 3 fasa radial tipe pohon dan beban yang terpasang terdapat 32 bus (bus 1 sebagai bus sumber). Data beban dan saluran dari sistem IEEE-33bus dapat dilihat pada lampiran 2. Pada tabel 4.1 menunjukkan hasil simulasi *load flow* dengan metode *forward-backward sweep* untuk dianalisa pada metode selanjutnya.

4.2 Analisis Aliran Daya Awal IEEE-33 Bus

Untuk dapat dilakukan analisa penentuan lokasi dan nilai optimal kapasitor. Maka, dilakukan analisa *load flow*. Untuk dapat melakukan analisa *load flow* maka data saluran dan data pembebanan setiap dibutuhkan dalam analisa ini. untuk menjalankan simulasi *load flow*, maka digunakan bantuan *software MATLAB 2009a*. Pada tabel 4.1 dibawah ini menunjukkan hasil simulasi *load flow* dengan metode *forward backward*.

Tabel 4.1 Hasil Analisa Aliran Daya sistem IEEE-33 Bus

No Bus	Fasa	Tegangan		Power Flow		Losses	
		KV	Derajat	KW	KVAR	KW	KVAR
1	R	12,660	0,0000	3797,6580	2723,0494	0,0000	0,0000
	S	12,660	-120,0000	3797,6580	2723,0494	0,0000	0,0000
	T	12,660	120,0000	3797,6580	2723,0494	0,0000	0,0000
2	R	12,588	0,2327	3797,6580	2723,0494	12,7062	6,4771
	S	12,588	-119,7673	3797,6580	2723,0494	12,7062	6,4771
	T	12,588	120,2327	3797,6580	2723,0494	12,7062	6,4771
3	R	12,253	1,4129	3198,6677	2498,4040	54,0983	27,5539
	S	12,253	-118,5871	3198,6677	2498,4040	54,0983	27,5539
	T	12,253	121,4129	3198,6677	2498,4040	54,0983	27,5539
4	R	12,084	2,1224	2139,5616	1941,9732	20,9268	10,6578
	S	12,084	-117,8776	2139,5616	1941,9732	20,9268	10,6578
	T	12,084	122,1224	2139,5616	1941,9732	20,9268	10,6578
5	R	11,920	2,8470	1974,9747	1853,2247	19,6753	10,0209
	S	11,920	-117,1530	1974,9747	1853,2247	19,6753	10,0209
	T	11,920	122,8470	1974,9747	1853,2247	19,6753	10,0209
6	R	11,721	3,7705	1857,2421	1817,3155	40,2524	34,7478
	S	11,721	-116,2295	1857,2421	1817,3155	40,2524	34,7478
	T	11,721	123,7705	1857,2421	1817,3155	40,2524	34,7478
7	R	11,620	2,9969	1037,4959	658,1889	2,0930	6,9185
	S	11,620	-117,0031	1037,4959	658,1889	2,0930	6,9185
	T	11,620	122,9969	1037,4959	658,1889	2,0930	6,9185
8	R	11,472	3,4634	833,8847	537,8186	5,3446	1,7588
	S	11,472	-116,5366	833,8847	537,8186	5,3446	1,7588
	T	11,472	123,4634	833,8847	537,8186	5,3446	1,7588

Tabel 4.1 Hasil Analisa Aliran Daya sistem IEEE-33 Bus (Lanjutan)

9	R	11,351	3,8540	637,7509	414,4058	4,6243	3,3223
	S	11,351	-116,1460	637,7509	414,4058	4,6243	3,3223
	T	11,351	123,8540	637,7509	414,4058	4,6243	3,3223
10	R	11,238	4,2364	572,6225	386,5191	3,9457	2,7967
	S	11,238	-115,7636	572,6225	386,5191	3,9457	2,7967
	T	11,238	124,2364	572,6225	386,5191	3,9457	2,7967
11	R	11,212	4,3267	514,4843	357,8928	0,6143	0,2031
	S	11,212	-115,6733	514,4843	357,8928	0,6143	0,2031
	T	11,212	124,3267	514,4843	357,8928	0,6143	0,2031
12	R	11,167	4,4821	471,7394	321,4569	0,9783	0,3235
	S	11,167	-115,5179	471,7394	321,4569	0,9783	0,3235
	T	11,167	124,4821	471,7394	321,4569	0,9783	0,3235
13	R	11,066	4,8308	412,4378	277,5217	2,9627	2,3310
	S	11,066	-115,1692	412,4378	277,5217	2,9627	2,3310
	T	11,066	124,8308	412,4378	277,5217	2,9627	2,3310
14	R	11,037	4,5960	359,1680	230,8663	0,8106	1,0670
	S	11,037	-115,4040	359,1680	230,8663	0,8106	1,0670
	T	11,037	124,5960	359,1680	230,8663	0,8106	1,0670
15	R	11,018	4,6463	252,9448	132,7232	0,3972	0,3536
	S	11,018	-115,3537	252,9448	132,7232	0,3972	0,3536
	T	11,018	124,6463	252,9448	132,7232	0,3972	0,3536
16	R	10,991	4,7279	194,7046	113,1642	0,3133	0,2288
	S	10,991	-115,2721	194,7046	113,1642	0,3133	0,2288
	T	10,991	124,7279	194,7046	113,1642	0,3133	0,2288
17	R	10,965	4,5017	138,8074	82,8352	0,2801	0,3740
	S	10,965	-115,4983	138,8074	82,8352	0,2801	0,3740
	T	10,965	124,5017	138,8074	82,8352	0,2801	0,3740

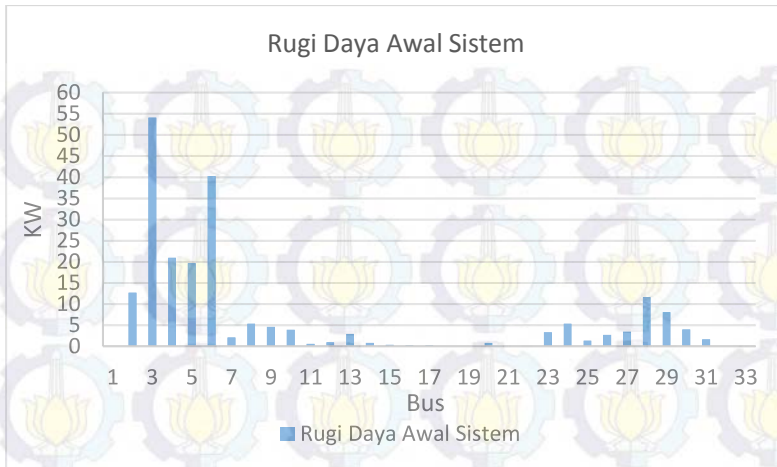
Tabel 4.1 Hasil Analisa Aliran Daya sistem IEEE-33 Bus (Lanjutan)

18	R	10,955	4,5365	82,5663	53,6918	0,0592	0,0464
	S	10,955	-115,4635	82,5663	53,6918	0,0592	0,0464
	T	10,955	124,5365	82,5663	53,6918	0,0592	0,0464
19	R	12,584	0,2414	359,5762	163,6530	0,1616	0,1543
	S	12,584	-119,7586	359,5762	163,6530	0,1616	0,1543
	T	12,584	120,2414	359,5762	163,6530	0,1616	0,1543
20	R	12,542	0,3287	268,8295	122,8958	0,8355	0,7529
	S	12,542	-119,6713	268,8295	122,8958	0,8355	0,7529
	T	12,542	120,3287	268,8295	122,8958	0,8355	0,7529
21	R	12,537	0,2803	179,2944	81,6824	0,1011	0,1182
	S	12,537	-119,7197	179,2944	81,6824	0,1011	0,1182
	T	12,537	120,2803	179,2944	81,6824	0,1011	0,1182
22	R	12,531	0,2201	89,6901	40,6902	0,0438	0,0579
	S	12,531	-119,7799	89,6901	40,6902	0,0438	0,0579
	T	12,531	120,2201	89,6901	40,6902	0,0438	0,0579
23	R	12,179	1,6071	909,8525	511,9500	3,3157	2,2656
	S	12,179	-118,3929	909,8525	511,9500	3,3157	2,2656
	T	12,179	121,6071	909,8525	511,9500	3,3157	2,2656
24	R	12,067	1,9013	812,9231	456,9771	5,3633	4,2351
	S	12,067	-118,0987	812,9231	456,9771	5,3633	4,2351
	T	12,067	121,9013	812,9231	456,9771	5,3633	4,2351
25	R	12,011	2,0531	404,6006	229,5613	1,3441	1,0518
	S	12,011	-117,9469	404,6006	229,5613	1,3441	1,0518
	T	12,011	122,0531	404,6006	229,5613	1,3441	1,0518
26	R	11,687	4,0142	755,9861	1111,6234	2,6861	1,3682
	S	11,687	-115,9858	755,9861	1111,6234	2,6861	1,3682
	T	11,687	124,0142	755,9861	1111,6234	2,6861	1,3682

Tabel 4.1 Hasil Analisa Aliran Daya sistem IEEE-33 Bus (Lanjutan)

27	R	11,643	4,3476	691,1721	1078,4738	3,4401	1,7515
	S	11,643	-115,6524	691,1721	1078,4738	3,4401	1,7515
	T	11,643	124,3476	691,1721	1078,4738	3,4401	1,7515
28	R	11,562	5,0143	619,0825	1044,6626	11,6826	10,300
	S	11,562	-114,9857	619,0825	1044,6626	11,6826	10,300
	T	11,562	125,0143	619,0825	1044,6626	11,6826	10,300
29	R	11,504	5,5322	551,5320	1014,4994	8,1027	7,0589
	S	11,504	-114,4678	551,5320	1014,4994	8,1027	7,0589
	T	11,504	125,5322	551,5320	1014,4994	8,1027	7,0589
30	R	11,453	6,0582	436,7728	922,7531	4,0322	2,0539
	S	11,453	-113,9418	436,7728	922,7531	4,0322	2,0539
	T	11,453	126,0582	436,7728	922,7531	4,0322	2,0539
31	R	11,439	6,1155	366,4141	294,1381	1,6441	1,6248
	S	11,439	-113,8845	366,4141	294,1381	1,6441	1,6248
	T	11,439	126,1155	366,4141	294,1381	1,6441	1,6248
32	R	11,430	6,0580	234,6494	193,5534	0,2199	0,2563
	S	11,430	-113,9420	234,6494	193,5534	0,2199	0,2563
	T	11,430	126,0580	234,6494	193,5534	0,2199	0,2563
33	R	11,424	6,0310	50,3165	51,6551	0,0136	0,0211
	S	11,424	-113,9690	50,3165	51,6551	0,0136	0,0211
	T	11,424	126,0310	50,3165	51,6551	0,0136	0,0211

Dari data tabel diatas, terlihat data tegangan untuk setiap bus, daya yang diserap bus, dan rugi yang terjadi pada setiap bus. Dari data tersebut terlihat pada bus 9 sampai bus 18 nilai tegangan (dalam p.u) berada pada nilai < 0.9 pu. Dan dari hasil *load flow* total rugi daya yang terbangkitkan pada sistem adalah 213.0689 KW pada masing-masing fasa pada sistem distribusi. Berikut adalah plot dari rugi daya awal sistem pada setiap bus. Dan untuk analisa selanjutnya digunakan analisa pada salah satu fasa.



Gambar 4.1 Profil Rugi Daya Awal Sistem

4.3 Hasil Nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada Sistem IEEE-33 Bus

Dari hasil analisa *load flow* pada tabel 4.1, maka dapat dilakukan analisa penentuan lokasi optimal kapasitor dengan menggunakan metode *power loss index-loss sensitivity* pada sistem sehingga dapat diketahui bus mana yang menyumbang banyak daya reaktif pada sistem sehingga perlu dipasang kapasitor.

4.3.1 Hasil *Power Loss Index*

Pada sistem IEEE-33bus dianalisa pada setiap bus dengan menggunakan metode *Power loss index* sehingga dapat diketahui bus yang menyumbang daya reaktif yang besar. Pada tabel 4.2 dibawah ini menunjukkan data *Power Loss Index* setiap bus.

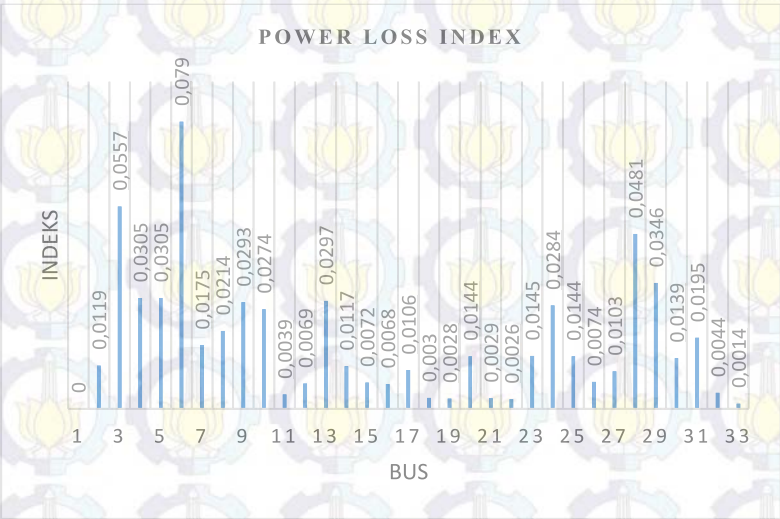
Tabel 4.2 Hasil *Power Loss Index* pada sistem IEEE-33 Bus

No Bus	<i>Power Loss Index</i>
1	0
2	0,0119
3	0,0557
4	0,0305
5	0,0304
6	0,079
7	0,0175
8	0,0214
9	0,0293
10	0,0274
11	0,0039
12	0,0069
13	0,0297
14	0,0117
15	0,0072
16	0,0068
17	0,0106
18	0,003
19	0,0028
20	0,0144
21	0,0029
22	0,0026
23	0,0145
24	0,0284
25	0,0144
26	0,0074

Tabel 4.2 Hasil *Power Loss Index* (Lanjutan)

No Bus	<i>Power Loss Index</i>
27	0,0103
28	0,0481
29	0,0346
30	0,0139
31	0,0195
32	0,0044
33	0,0014

Dari hasil tabel analisa indeks 4.2 pada sistem IEEE-33 bus, dapat dilihat bahwa pada bus 6 memiliki indeks tertinggi yaitu sebesar 0.079 dan indeks terendah adalah 0 pada bus 1. Dan pada gambar 4.2 menunjukkan grafik indeks pada setiap bus.



Gambar 4.2 Grafik *Power Loss Index* Pada IEEE-33 Bus

4.3.2 Hasil *Loss Sensitivity*

Pada sistem IEEE-33bus dianalisa pada setiap bus dengan menggunakan metode *Loss Sensitivity* sehingga dapat diketahui bus yang menyumbang daya reaktif yang besar. Pada tabel 4.3 dibawah ini menunjukkan data *Loss Sensitivity* setiap bus.

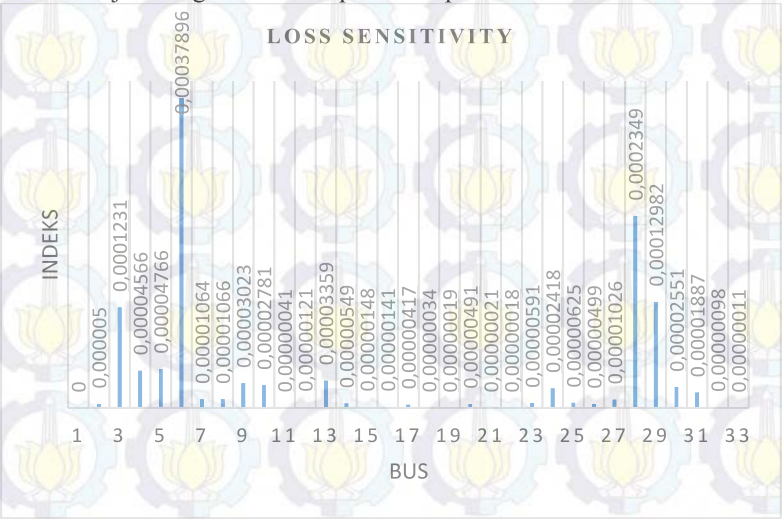
Tabel 4.3 Hasil *Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 Bus

No Bus	<i>Loss Sensitivity</i>
1	0
2	0,000005
3	0,0001231
4	0,00004566
5	0,00004766
6	0,00037896
7	0,00001064
8	0,00001066
9	0,00003023
10	0,00002781
11	0,00000041
12	0,00000121
13	0,00003359
14	0,00000549
15	0,00000148
16	0,00000141
17	0,00000417
18	0,00000034
19	0,00000019
20	0,00000491
21	0,00000021
22	0,00000018
23	0,00000591

Tabel 4.3 Hasil *Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 Bus (Lanjutan)

No Bus	Loss Sensitivity
24	0,00002418
25	0,00000625
26	0,00000499
27	0,00001026
28	0,0002349
29	0,00012982
30	0,00002551
31	0,00001887
32	0,00000098
33	0,00000011

Dari hasil tabel analisa *Loss Sensitivity* 4.3 pada sistem IEEE-33 bus, dapat dilihat bahwa pada bus 6 memiliki indeks tertinggi yaitu sebesar 0,00037896 dan indeks terendah adalah 0 pada bus 1. Dan pada gambar 4.3 menunjukkan grafik indeks pada setiap bus.



Gambar 4.3 Grafik *Loss Sensitivity* Pada IEEE-33 Bus

Dari dua hasil analisa metode *Power Loss Index* dan *Loss Sensitivity* diatas, bisa dilihat nilai pada bus yang sama pada dua metode tersebut bernilai berbeda. Untuk penentuan lokasi kapasitor adalah pada *power loss index* yang memiliki indeks lebih besar dari 0.0304 pada sistem IEEE-33 bus. Bus yang memiliki PLI kurang dari 0.0304 pada sistem IEEE-33 bus tidak memiliki pengurangan daya signifikan. Dengan analisa pada bus yang sama, kita juga menentukan pada metode *loss sensitivity* dengan nilai minimum pada metode *Power Loss Index* (0.0304). pada bus tersebut adalah bus kemungkinan bus potensial untuk penempatan kapasitor. Pada simulasi ini dilakukan analisa penempatan 6 nilai indeks terbesar hingga 1 nilai indeks terbesar. Setelah itu dilakukan analisa dengan nilai kapasitor yang berbeda-beda, sehingga dapat diketahui kombinasi penempatan dan nilai optimal kapasitor.

Pada tabel 4.4 dibawah menunjukkan 6 bus potensial yang akan dipasang kapasitor.

Tabel 4.4 Hasil 6 Bus Potensial dengan metode *Power loss index- Loss sensitivity*

No Bus	Nilai Indeks
6	0,079
3	0,0557
28	0,0481
29	0,0346
4	0,0305
5	0,0304

4.3.3 Hasil Penentuan Lokasi 6 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 6 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0303.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.4 Hasil Penentuan Lokasi 5 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 5 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0304.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.5 Hasil Penentuan Lokasi 4 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 4 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0305.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.6 Hasil Penentuan Lokasi 3 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 4 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0305.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.7 Hasil Penentuan Lokasi 2 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 4 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0305.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.3.8 Hasil Penentuan Lokasi 1 Buah Kapasitor berdasarkan nilai *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Pada pemilihan lokasi kapasitor berdasarkan pada nilai indeks *Power Loss Index-Loss Sensitivity* pada sistem IEEE-33 bus diambil 4 nilai indeks terbesar sesuai pada tabel 4.4 atau dengan nilai indeks yang lebih besar dari 0.0305.

Dan untuk analisa nilai kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*.

4.4 Hasil *Direct Search Algorithm*

Setelah dilakukan analisa penentuan lokasi kapasitor pada sistem IEEE-33 Bus untuk penentuan lokasi optimal kapasitor, maka untuk penentuan nilai optimal kapasitor dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Search Algorithm*. Untuk penentuan nilai kapasitor maka pada tabel 4.5 dibawah akan diberikan beberapa nilai kapasitor dengan asumsi harga kapasitor per KVAR adalah 3 \$/KVAR [3].

Tabel 4.5 Daftar Nilai Kapasitor

Nilai Qc yang tersedia (KVAR)				
100	350	600	850	1100
150	400	650	900	1150
200	450	700	950	1200
250	500	750	1000	1250
300	550	800	1050	1300

Dengan menggunakan data penentuan lokasi kapasitor, maka analisa DSA dengan menggunakan kondisi nilai kapasitor pada tabel diatas dengan batasan fungsi objektif pada *Direct Search Algorithm* seperti pada rumus (3.20).

4.4.1 Pemasangan 6 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.6 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 6 kapasitor pada sistem dengan 6 nilai indeks terbesar.

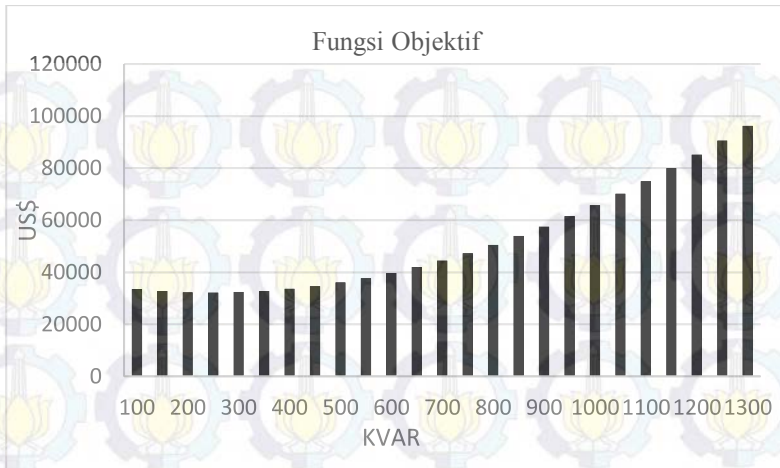
Tabel 4.6 Hasil *Running Direct Search Algorithm* dengan 6 Kapasitor

No	nilaiC	Rugi Daya	Keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	188,86895	37264,36964	33529,983
2	150	179,25674	43284,27102	32815,133
3	200	171,40085	48705,64488	32395,344
4	250	165,28395	53283,80361	32267,703
5	300	160,92722	56756,78514	32435,773

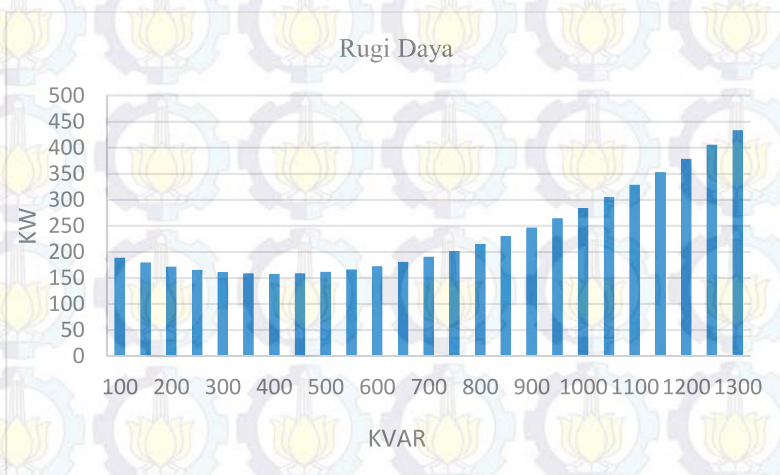
Tabel 4.6 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	Keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
6	350	158,34697	58903,75446	32902,29
7	400	157,55419	59577,53089	33669,103
8	450	158,55434	58728,62175	34737,129
9	500	161,3472	56413,8279	36106,33
10	550	165,92684	52786,76132	37775,709
11	600	172,28172	48073,1431	39743,33
12	650	180,39496	42537,94407	42006,354
13	700	190,24464	36452,56421	44561,1
14	750	201,80425	30068,41571	47403,115
15	800	215,05401	23595,01405	50529,074
16	850	229,95466	17206,23421	53932,383
17	900	246,46391	11029,84944	57605,937
18	950	264,54097	5151,11218	61542,884
19	1000	284,14292	-378,20965	65736,01
20	1050	305,22525	-5532,44139	70177,843
21	1100	328,8041	-10514,02446	75039,089
22	1150	352,98525	-14931,6172	80001,522
23	1200	378,52588	-18984,66623	85192,347
24	1250	405,37374	-22694,55702	90602,789
25	1300	433,47579	-26085,49574	96223,932

Dari hasil data tabel 4.6, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 4.4 Hubungan Fungsi Objektif dan nilai 6 Kapasitor



Gambar 4.5 Hubungan Rugi Daya dan nilai 6 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.4 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 250 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 47.7849 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 165.284 KW dan nilai F sebesar 3527.8704 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733

US\$ menjadi sebesar 32267.70295 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 53283.80361 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 6 kapasitor 250 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 250 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.2 Pemasangan 5 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.7 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 5 kapasitor pada sistem dengan 5 nilai indeks terbesar.

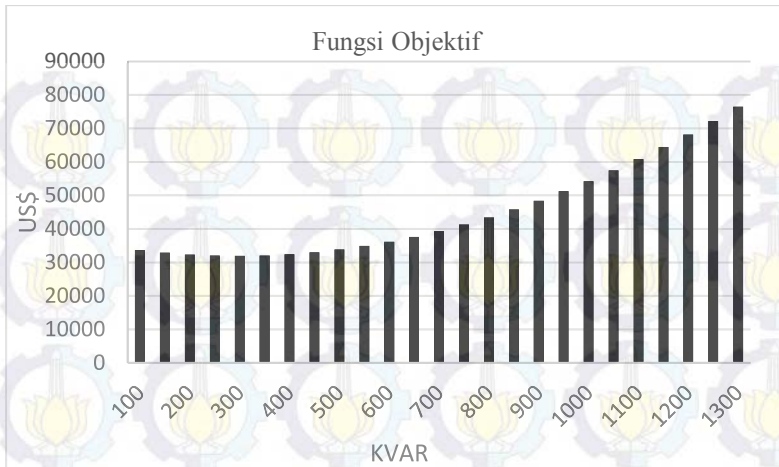
Tabel 4.7 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 5 Kapasitor

No	nilaiC	Rugi Daya	Keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	191,40567	48276,51779	33656,152
2	150	182,45836	53708,72675	32903,004
3	200	174,78364	58811,43251	32363,651
4	250	168,44243	63378,34	32048,328
5	300	163,42144	67245,84674	31954,802
6	350	159,73441	70240,67625	32085,38
7	400	157,39198	72216,22502	32441,853
8	450	156,40154	73069,34217	33025,458

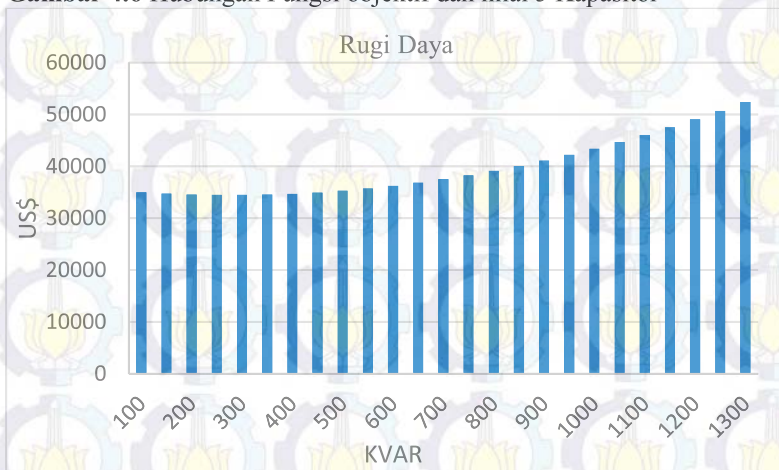
Tabel 4.7 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	Keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
9	500	156,76705	72753,25586	33836,864
10	550	158,48899	71283,7641	34876,15
11	600	161,56433	68737,21558	36142,808
12	650	165,9866	65240,75615	37635,748
13	700	171,74593	60957,09109	39353,317
14	750	178,82931	56066,98846	41293,325
15	800	187,22074	50752,6951	43453,084
16	850	196,90149	45184,57446	45829,451
17	900	207,85922	39507,75791	48420,349
18	950	220,06706	33849,0538	51221,267
19	1000	233,49511	28308,12526	54227,179
20	1050	248,11592	22957,045	57433,474
21	1100	263,90067	17845,5822	60835,313
22	1150	280,81951	13004,91547	64427,678
23	1200	298,84182	8451,42711	68205,425
24	1250	317,93654	4190,20655	72163,338
25	1300	339,36908	-21,55275	76514,006

Dari hasil data tabel 4.7, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 4.6 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 5 Kapasitor



Gambar 4.7 Hubungan Rugi Daya dan nilai 5 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.6 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 300 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 49.6474 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 163.421 KW dan nilai F sebesar 3840.7712 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733 US\$ menjadi sebesar 31954.80215 US\$ dengan pemasangan kapasitor

tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 67245.84674 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 5 kapasitor 300 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 300 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.3 Pemasangan 4 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.8 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 4 kapasitor pada sistem dengan 4 nilai indeks terbesar.

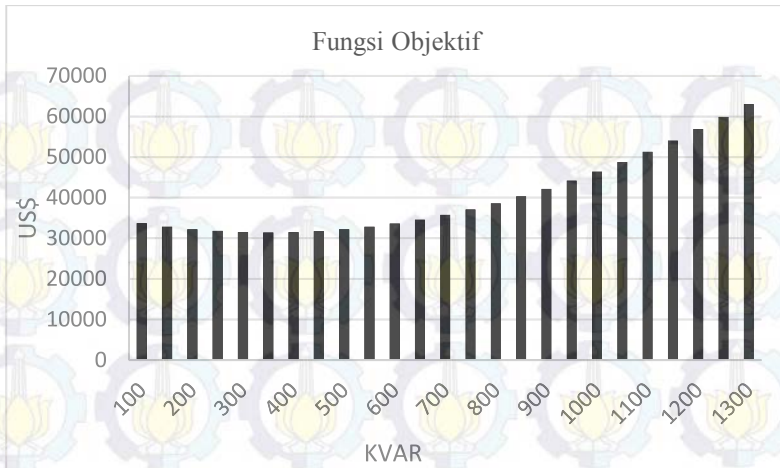
Tabel 4.8 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 4 Kapasitor

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	193,44876	59606,56279	33699,391
2	150	185,12553	64534,46429	32901,089
3	200	177,79846	69254,42718	32270,141
4	250	171,53394	73609,66966	31817,701
5	300	166,31145	77491,24057	31540,324
6	350	162,14259	80769,17688	31439,955
7	400	159,03687	83322,8743	31518,195
8	450	157,0016	85051,19085	31776,269
9	500	156,04175	85881,92859	32215,013
10	550	156,15987	85779,1421	32834,858
11	600	157,35609	84746,94741	33635,824
12	650	159,62807	82829,09869	34617,517

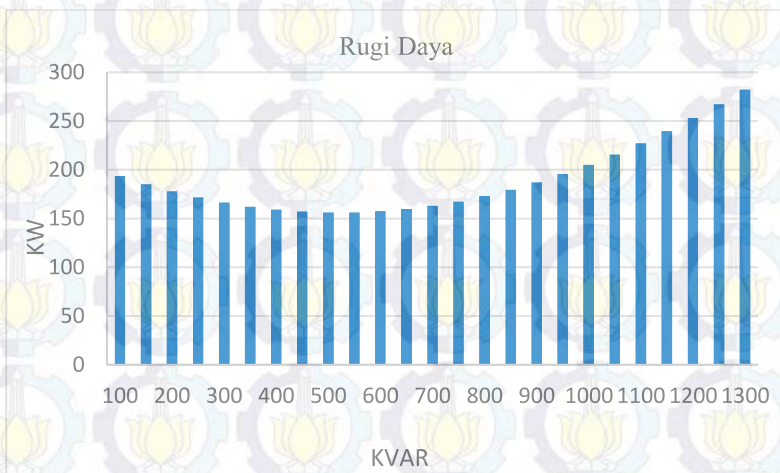
Tabel 4.8 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
13	700	162,97105	80104,41387	35779,137
14	750	167,37792	76678,91839	37119,49
15	800	172,8393	72676,10881	38637,003
16	850	179,34375	68226,88708	40329,75
17	900	186,87784	63460,5024	42195,477
18	950	195,42639	58497,39152	44231,633
19	1000	204,98711	53437,00847	46437,834
20	1050	215,52528	48379,42443	48808,248
21	1100	227,02355	43396,71225	51339,957
22	1150	239,4609	38545,78458	54029,431
23	1200	252,81543	33868,50963	56872,992
24	1250	267,06456	29393,73757	59866,845
25	1300	282,18521	25139,49055	63007,116

Dari hasil data tabel 4.8, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 4.8 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 4 Kapasitor



Gambar 4.9 Hubungan Rugi Daya dan nilai 4 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.8 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 350 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 50.9263 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 162.143 KW dan nilai F sebesar 4355.6179 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733

US\$ menjadi sebesar 31439.95545 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 80769.17688 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 5 kapasitor 350 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 350 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.4 Pemasangan 3 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.9 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 3 kapasitor pada sistem dengan 3 nilai indeks terbesar.

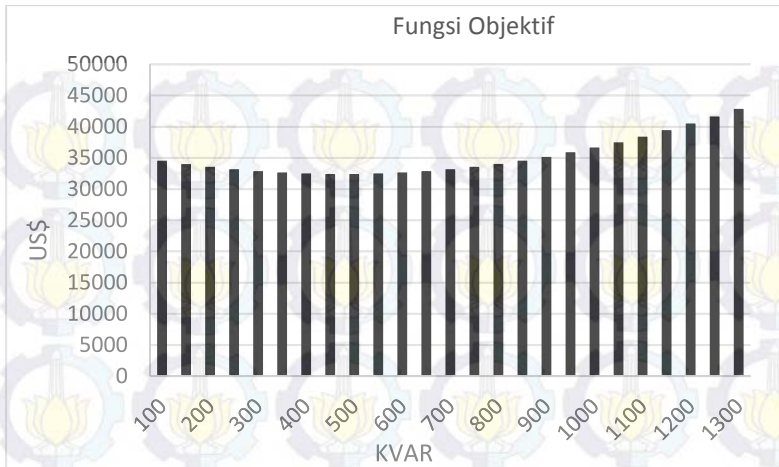
Tabel 4.9 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 3 Kapasitor

No Cap	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	200,18476	68418,4164	34531,041
2	150	194,38279	71579,89055	34006,308
3	200	189,01346	74678,53814	33554,261
4	250	184,08092	77684,41894	33175,594
5	300	179,56544	80580,92825	32866,993
6	350	175,52669	83297,88857	32638,484
7	400	171,93492	85821,3893	32485,067
8	450	168,79313	88116,80344	32407,246
9	500	166,104	90150,46581	32405,472
10	550	163,86991	91890,76504	32480,145
11	600	162,0929	93309,26968	32631,606

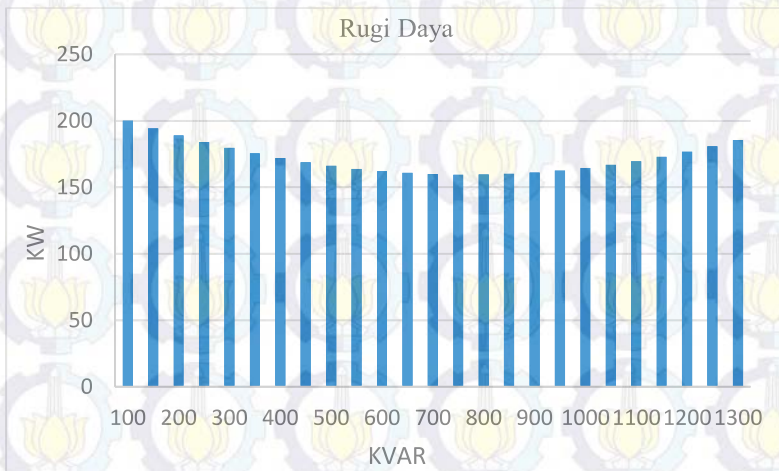
Tabel 4.9 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
12	650	160,77465	94381,82156	32860,141
13	700	159,91651	95089,52312	33165,973
14	750	159,51945	95419,54702	33549,268
15	800	159,5841	95365,70495	34010,128
16	850	160,11067	94928,72977	34548,593
17	900	161,09906	94116,24713	35164,642
18	950	162,54873	92942,43906	35858,187
19	1000	164,45883	91427,42687	36629,083
20	1050	166,82809	89596,42276	37477,119
21	1100	169,65491	87478,71531	38402,026
22	1150	172,93735	85106,56154	39403,474
23	1200	176,67308	82514,05833	40481,077
24	1250	180,85949	79736,05885	41634,394
25	1300	185,49361	76807,18735	42862,927

Dari hasil data tabel 4.9, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 4.10 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 3 Kapasitor



Gambar 4.11 Hubungan Rugi Daya dan nilai 3 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 500 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 46.9649 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 166.104 KW dan nilai F sebesar 3390.1009 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733

US\$ menjadi sebesar 32405.47241 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 90150.46581 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 3 kapasitor 500 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 500 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.5 Pemasangan 2 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.8 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 2 kapasitor pada sistem dengan 2 nilai indeks terbesar.

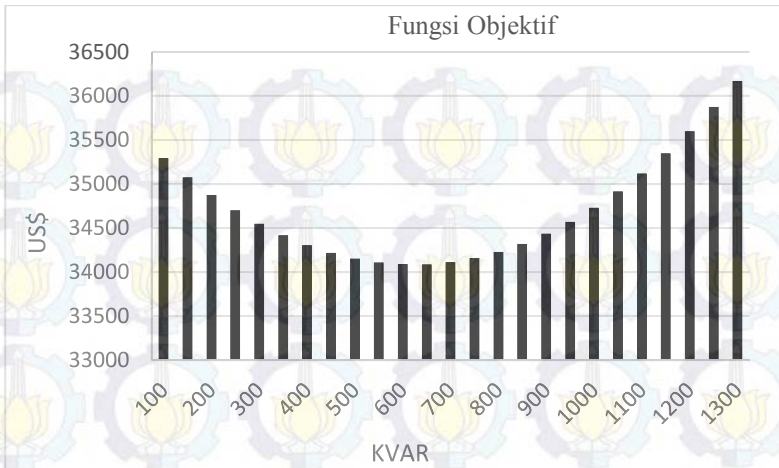
Tabel 4.10 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 3 Kapasitor

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	206,5047	77676,85458	35292,79
2	150	203,4154	79236,22498	35073,787
3	200	200,45531	80775,46088	34876,493
4	250	197,62495	82290,36682	34700,991
5	300	194,92479	83776,58855	34547,364
6	350	192,35529	85229,63236	34415,689
7	400	189,91692	86644,88766	34306,043
8	450	187,6101	88017,65288	34218,497
9	500	185,43525	89343,16465	34153,122
10	550	183,39276	90616,63005	34109,984
11	600	181,48302	91833,26172	34089,148

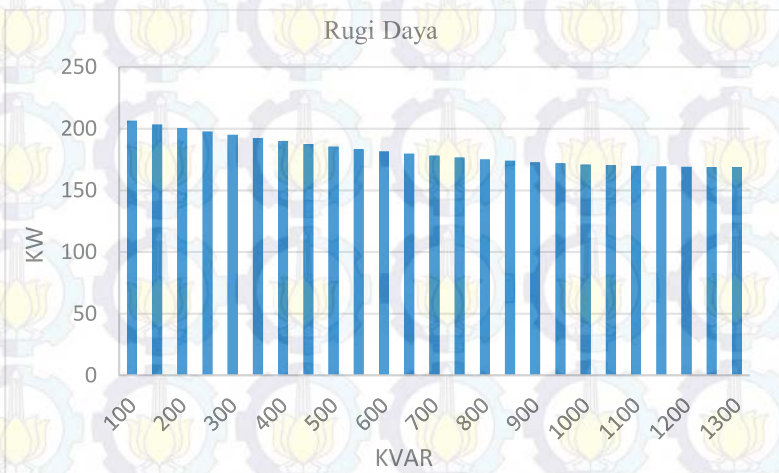
Tabel 4.10 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
12	650	179,68031	93005,43837	34086,291
13	700	178,04091	94092,02632	34110,874
14	750	176,53515	95107,82702	34157,905
15	800	175,16331	96048,48285	34227,437
16	850	173,92568	96909,84629	34319,515
17	900	172,82252	97688,02239	34434,183
18	950	171,85407	98379,4103	34571,483
19	1000	171,02054	98980,74293	34731,45
20	1050	170,32213	99489,12409	34914,119
21	1100	169,75903	99902,06218	35119,518
22	1150	169,33139	100217,5	35347,673
23	1200	169,03934	100433,8396	35598,609
24	1250	168,88299	100549,9622	35872,343
25	1300	168,86244	100565,2421	36168,89

Dari hasil data tabel 4.10, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 4.12 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 2 Kapasitor



Gambar 4.13 Hubungan Rugi Daya dan nilai 2 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.12 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 650 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 33.3886 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 179.680 KW dan nilai F sebesar 1709.2819 US\$ dari nilai awal F adalah 35795.5733

US\$ menjadi sebesar 34086.29142 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 93005.43837 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 2 kapasitor 650 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 350 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.4.6 Pemasangan 1 Kapasitor Berdasarkan *Power Loss Index-Loss Sensitivity*

Dengan menggunakan data tabel 4.5, maka tabel 4.11 dibawah ini menunjukkan analisa nilai kapasitor *Direct Search Algorithm* dengan pemasangan 1 kapasitor pada sistem dengan nilai indeks terbesar.

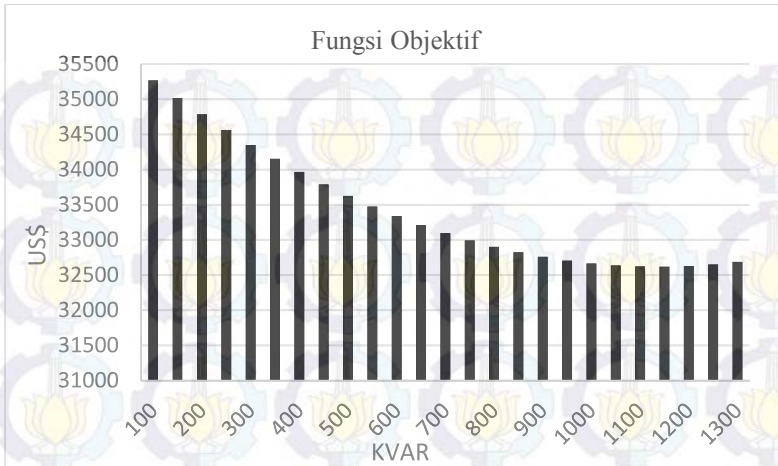
Tabel 4.11 Hasil *Running Direct Search Algorithm* Dengan 1 Kapasitor

No Cap	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
	KVAR	KW	US\$	US\$
1	100	208,13756	89371,34574	35267,11
2	150	205,77684	90540,03603	35020,51
3	200	203,48645	91699,82732	34785,724
4	250	201,26665	92849,06199	34562,798
5	300	199,1177	93986,02714	34351,774
6	350	197,03985	95108,95801	34152,695
7	400	195,03334	96216,04203	33965,602
8	450	193,09842	97305,4234	33790,534
9	500	191,2353	98375,20822	33627,53
10	550	189,44421	99423,47025	33476,627
11	600	187,72537	100448,2572	33337,862

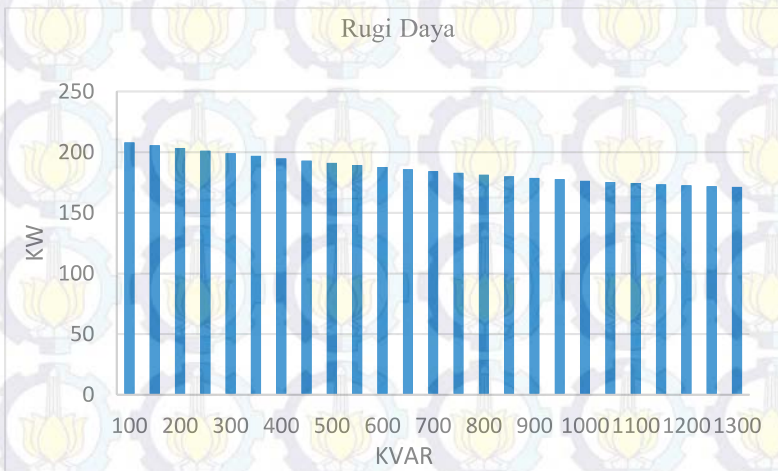
Tabel 4.11 Hasil *Running Direct Search*.....(Lanjutan)

No	nilaiC	Rugi Daya	keuntungan	F
Cap	KVAR	KW	US\$	US\$
12	650	186,07898	101447,5976	33211,269
13	700	184,50526	102419,5083	33096,883
14	750	183,00438	103362,0021	32994,735
15	800	181,55213	104288,7911	32900,757
16	850	180,20065	105164,6875	32823,709
17	900	178,92246	106005,2667	32758,973
18	950	177,7177	106808,6199	32706,573
19	1000	176,58653	107572,88	32666,537
20	1050	175,5291	108296,2316	32638,888
21	1100	174,54553	108976,9206	32623,649
22	1150	173,63596	109613,2643	32620,84
23	1200	172,80049	110203,6615	32630,483
24	1250	172,03925	110746,6015	32652,595
25	1300	171,35233	111240,6735	32687,192

Dari hasil data tabel 4.11, dapat dibentuk sebuah grafik dari fungsi objektif (F) dan Rugi daya terhadap nilai kapasitor. Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 hubungan tersebut.



Gambar 4.14 Hubungan Fungsi objektif dan nilai 1 Kapasitor



Gambar 4.15 Hubungan Rugi Daya dan nilai 1 Kapasitor

Dari data tabel dan gambar 4.14 dapat dilihat bahwa nilai dari fungsi objektif (F) yang optimal adalah saat digunakan nilai kapasitor sebesar 1150 KVAR pada sistem dimana rugi daya turun sebesar 39.4329 KW atau dari rugi kondisi awal sistem sebesar 213.0689 KW menjadi 173.636 KW dan nilai F sebesar 3174.7328 US\$ dari nilai awal F adalah

35795.5733 US\$ menjadi sebesar 32620.84046 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dan mendapat keuntungan sebesar 110203.66153 US\$ dengan pemasangan kapasitor tersebut dimana asumsi umur dari kapasitor adalah 10 tahun.

Dan untuk grafik antara tegangan dan rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan 1 kapasitor 1150 KVAR ada pada lampiran 3.

Dari hasil analisa data dan grafik yang didapat, dapat dilihat bahwa pada bus yang mengalami rugi daya yang besar mengalami penurunan rugi setelah pemasangan kapasitor sebesar 1150 KVAR. Dan pada sistem juga mengalami peningkatan suplai daya aktif dan penurunan suplai daya reaktif. Hal ini disebabkan karena kapasitor berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif, sehingga suplai daya reaktif pada sistem berkurang dan berakibat naiknya suplai daya aktif.

4.5 Analisa Sistem Keseluruhan

Dari analisa kasus diatas dapat dilihat bahwa dengan menggunakan kombinasi penentuan lokasi *power loss index-loss sensitivity* dan nilai kapasitor dengan *Direct Search* yang tepat didapatkan penurunan rugi yang lebih besar dibandingkan dengan meminimalisasi atau memaksimalkan jumlah kapasitor. Dan dengan menurunkan nilai indeks secara tepat didapatkan penurunan nilai fungsi objektif pada *Direct Search Algorithm* lebih besar dengan menaikkan nilai KVAR pada kapasitor.

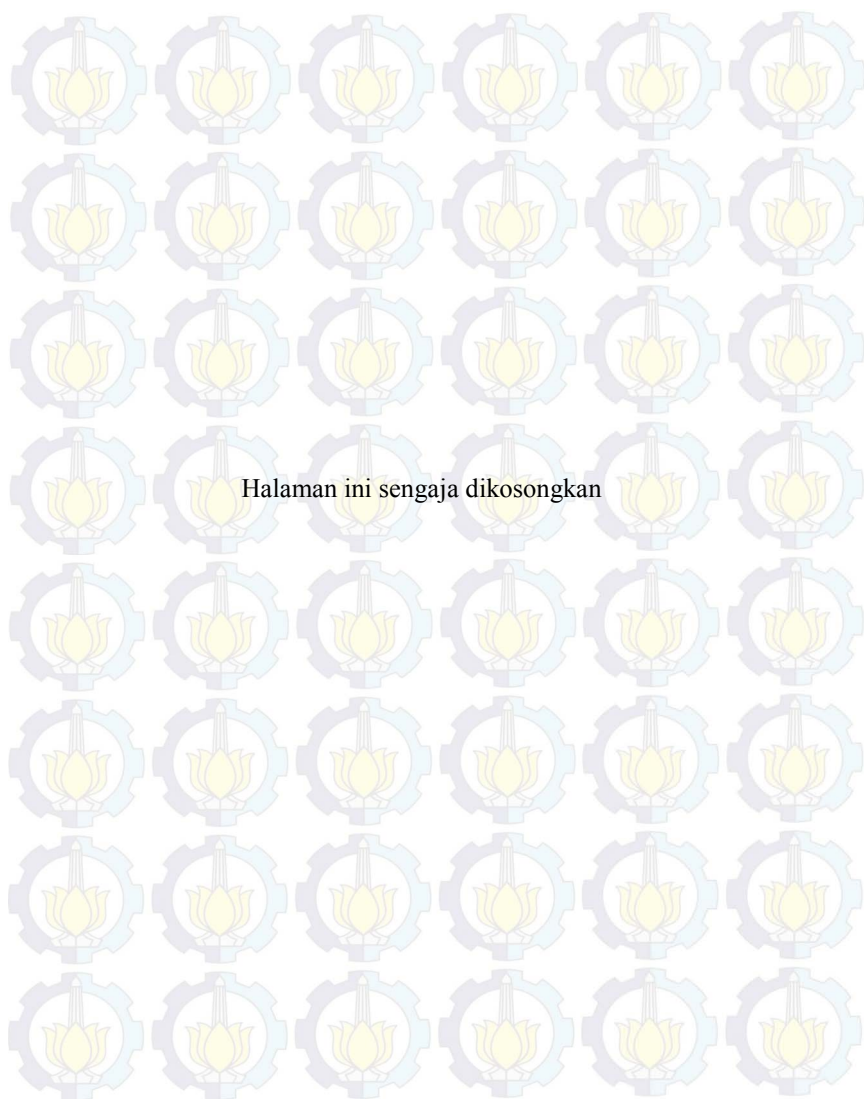
Tabel 4.12 Nilai F dan Rugi pada sistem pada setiap kasus

No	Keterangan (Berdasarkan nilai <i>Power Loss Index-Loss Sensitivity</i>)	Nilai F Minimum (US\$)	Rugi (KW)	Nilai Kapasitor
1	6 Kapasitor	32267,70295	165,284	250
2	5 Kapasitor	31954,80215	163,421	300
3	4 Kapasitor	31439,95545	162,143	350
4	3 Kapasitor	32405,47241	166,104	500
5	2 Kapasitor	34086,29142	179,68	650
6	1 Kapasitor	32620,84046	173,636	1150



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sushanta Paul, Ward Jewell, “Optimal Capacitor Placement and Sizes for Power Loss Reduction Using Combined Power Loss Index-Loss Sensitivity Factor and Genetic Algorithm”, IEEE, 2012
- [2] Fitriana Suhartati, Dimas Fajar U.P., Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto, “Capacitor Placement and Sizing in Distorted Distribution Systems Using Simplified Direct Search Algorithm”, Journal of Clean Energy Technologies, Vol.2, No.4, October 2014
- [3] M. Ramalinga Raju, K.V.S. Ramachandra Murthy, K.Ravindra, “Direct Search algorithm for capacitive compensation in radial distribution systems”, electrical Power and Energy Systems, vol.42, pp. 24-30. 2012.
- [4] Nova Gama, Fielman Lisi , M Tuegeh, A.F. Nelwan, ”Aliran Daya Optimal Pada Sistem Minahasa, Jurusan Teknik Elektro-FT, UNSRAT, Manado-95115
- [5] Eajal, A.A., El-Hawary, M.E., (2010). Optimal Capacitor Placement and Sizing in Unbalanced Distribution System with Harmonics Consideration Using Particle Swarm Optimization. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol 25, No. 3. Pp 1734-1741
- [6] Rahman, Abdel.T.k, G.B Jasmon, “ A new Technique For Voltage Stability Analysis in A Power System an Improve Algorithm For Distribution Network”, IEEE Catalogue
- [7] Yun Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po Wang, Evan Liu, Benjamin Yue, “Optimal Capacitor Placement to Distribution Transformers for Power Loss Reduction in Radial Distribution System”, IEEE, 2013
- [8] repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/29935/3/Chapter%20II.pdf
- [9] Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2014, www.eia.gov/forecasts/aeo/electricity_generation.cfm,



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisa data pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

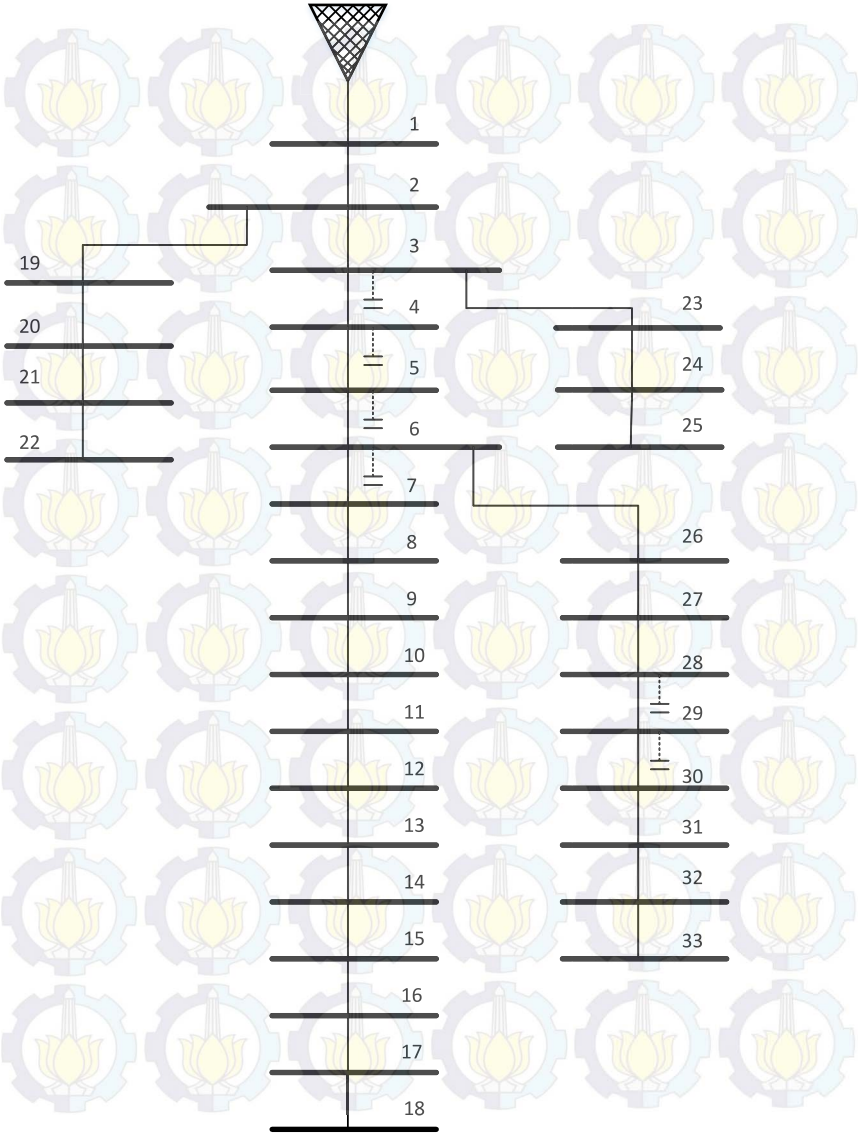
1. Metode *Power Loss Index* dan *Loss Sensitivity* dapat digunakan untuk menentukan indeks bus dalam suatu jaringan distribusi untuk mengetahui bus yang mengalami rugi terbesar.
2. Rugi daya yang terjadi pada jaringan distribusi disebabkan arus yang mengalir pada setiap bus tidak sama. Karena bus yang terdekat dengan sumber memiliki arus yang lebih besar dibanding bus yang jauh dari sumber dan hal ini menyebabkan rugi yang terjadi semakin besar.
3. Metode *Direct Search Algorithm* digunakan untuk menentukan nilai optimal kapasitor sesuai dengan fungsi objektif.
4. Untuk menurunkan kerugian daya pada suatu jaringan distribusi dapat menggunakan kompensasi daya reaktif berupa pemasangan kapasitor. Dan lebih efektif dengan penentuan letak dan nilai yang tepat menggunakan metode *Power Loss Index-Loss sensitivity* dan *Direct Search algorithm*.
5. Pada sistem IEEE-33 Bus indeks rugi tertinggi pada bus 3 sebesar 54,0983 KW dan rugi daya pada keseluruhan sistem adalah 213,0689 KW.
6. Dengan menggunakan kombinasi yang tepat antara metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity* dan *Direct Search* bisa didapat lokasi dan nilai optimal kapasitor dibandingkan dengan memaksimalkan salah satu metode.
7. Setelah dilakukan analisa pemasangan dan nilai kapasitor pada sistem IEEE-33 bus, didapat penurunan rugi daya pada sistem sebesar 50,9263 KW dari nilai rugi daya awal semula dengan 4 buah kapasitor dengan masing nilai 350 KVAR.

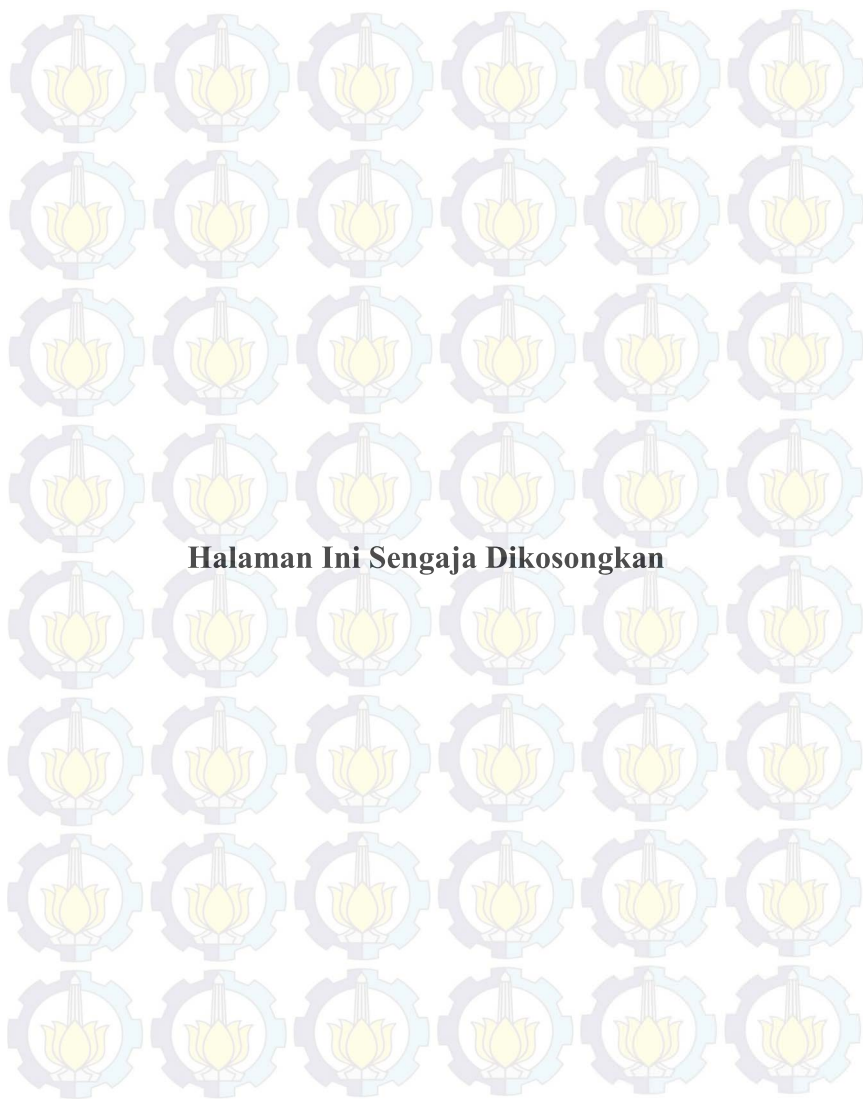
5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Metode *Power Loss Index-Loss Sensitivity* dan *Direct Search* dapat dikombinasikan dengan metode lain untuk optimasi lokasi dan nilai kapasitor.
2. Pada analisa optimasi kapasitor selanjutnya dapat dikembangkan dengan adanya pemasangan transformator atau pada sistem jaringan distribusi radial yang tidak seimbang.
3. Untuk optimasi pemasangan kapasitor dapat dipelajari lebih lanjut dengan menggunakan metode yang lainnya.
4. Pada analisa *Placement and sizing* selanjutnya dapat ditambahkan komponen optimasi lain selain kapasitor.

LAMPIRAN 1 : *Single Line Diagram IEEE-33 Bus*





LAMPIRAN 2 : Data Saluran dan Beban Sistem IEEE-33 Bus

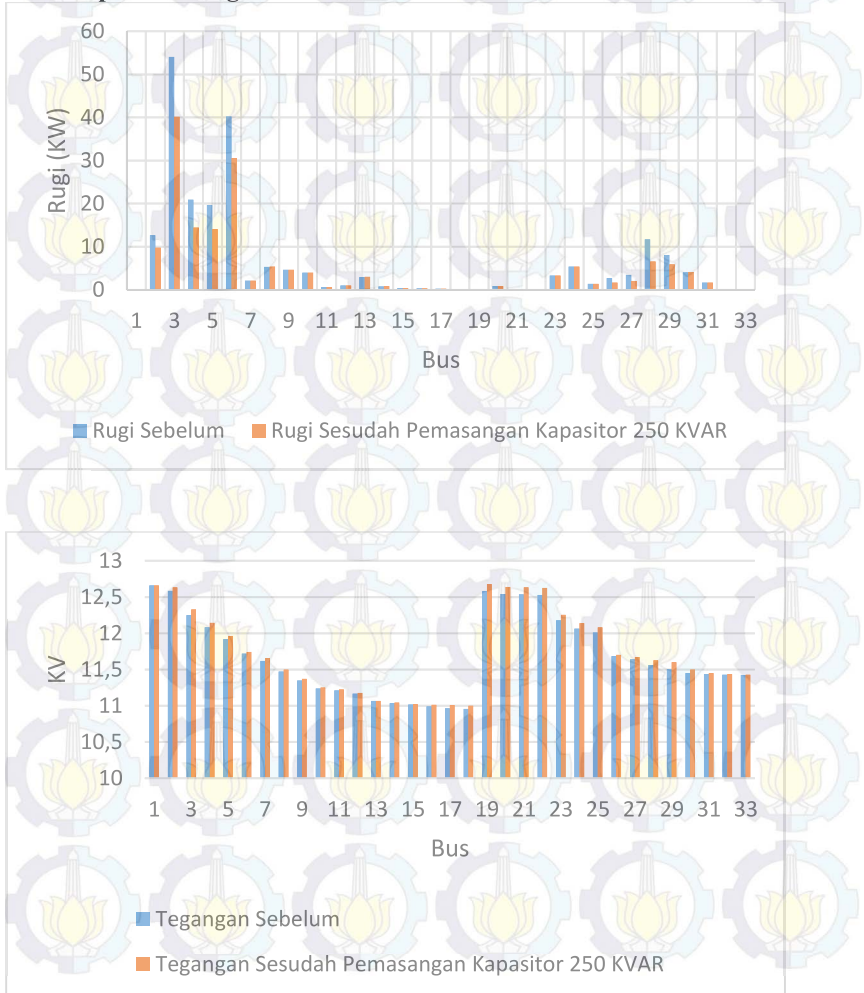
Dari Bus	Ke Bus	R (ohm)	X(ohm)
1	2	0.0922	0.047
2	3	0.493	0.2511
3	4	0.366	0.1864
4	5	0.3811	0.1941
5	6	0.819	0.707
6	7	0.1872	0.6188
7	8	0.7114	0.2351
8	9	1.03	0.74
9	10	1.044	0.74
10	11	0.1966	0.065
11	12	0.3744	0.1298
12	13	1.468	1.155
13	14	0.5416	0.7129
14	15	0.591	0.526
15	16	0.7463	0.545
16	17	1.289	1.721
17	18	0.732	0.574
2	19	0.164	0.1565
19	20	1.5042	1.3554
20	21	0.4095	0.4784
21	22	0.7089	0.9373
3	23	0.4512	0.3083
23	24	0.898	0.7091
24	25	0.896	0.7011
6	26	0.203	0.1034
26	27	0.2842	0.1447
27	28	1.059	0.9337
28	29	0.8042	0.7006
29	30	0.5075	0.2585
30	31	0.9744	0.963
31	32	0.3105	0.3619
32	33	0.341	0.5302

Bus	P(kW)	Q(VAR)
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40

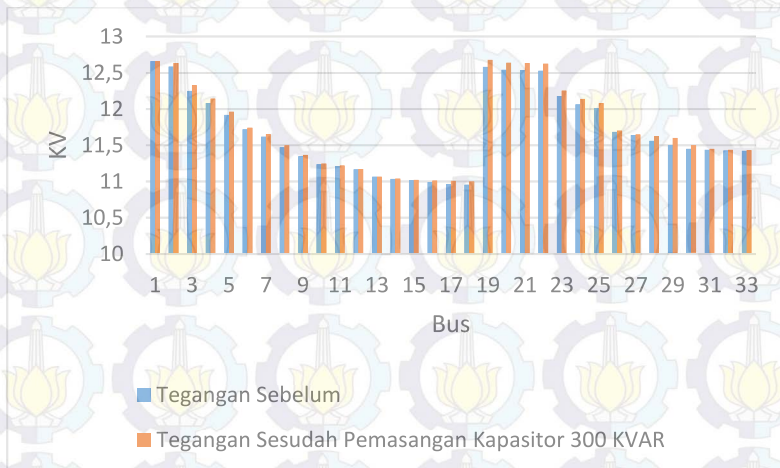
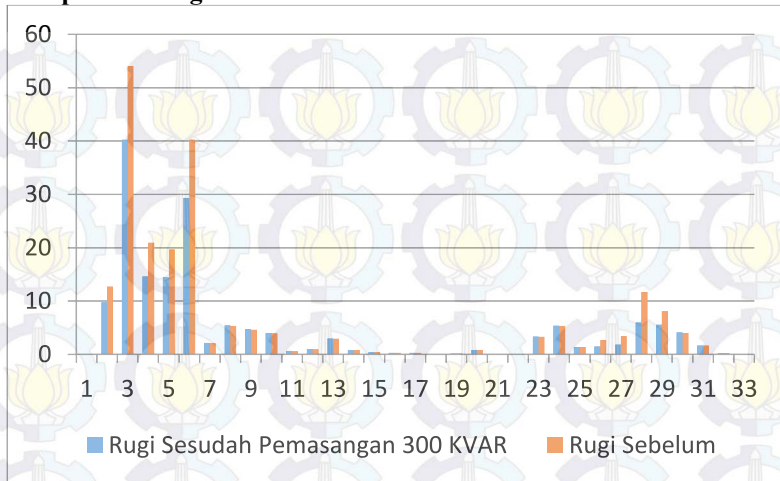
LAMPIRAN 3

Rugi Daya dan Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor

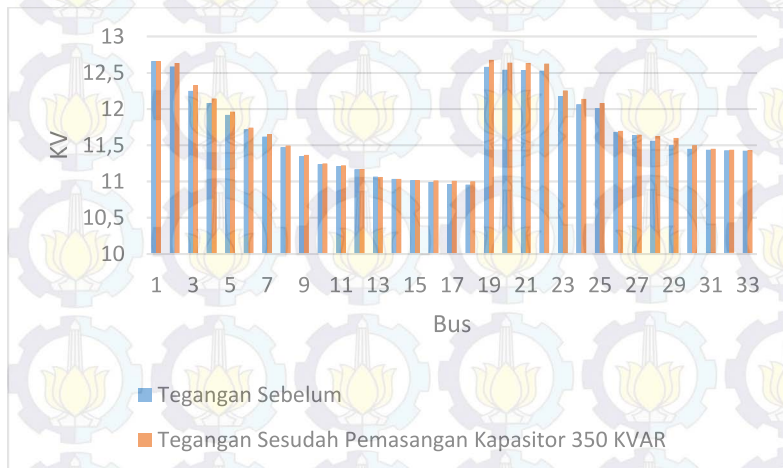
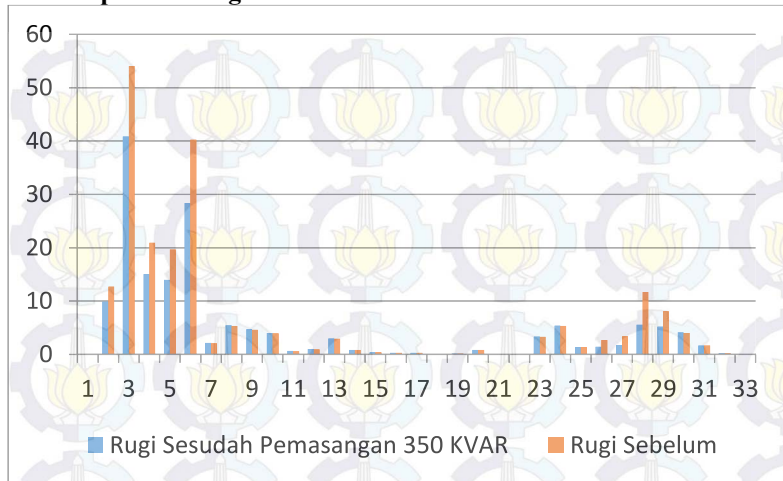
➤ 6 Kapasitor dengan nilai 250 KVAR



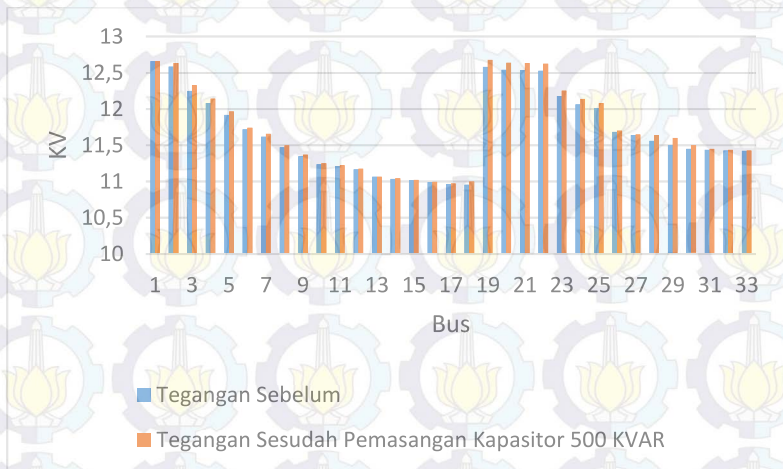
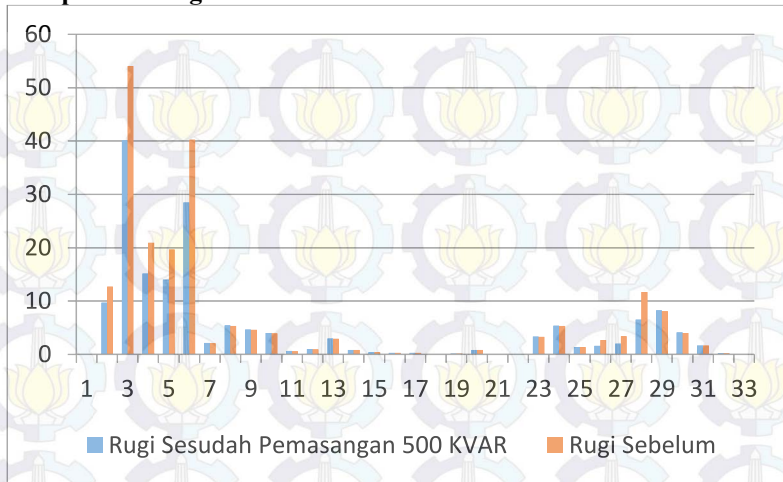
➤ **5 Kapasitor dengan nilai 300 KVAR**



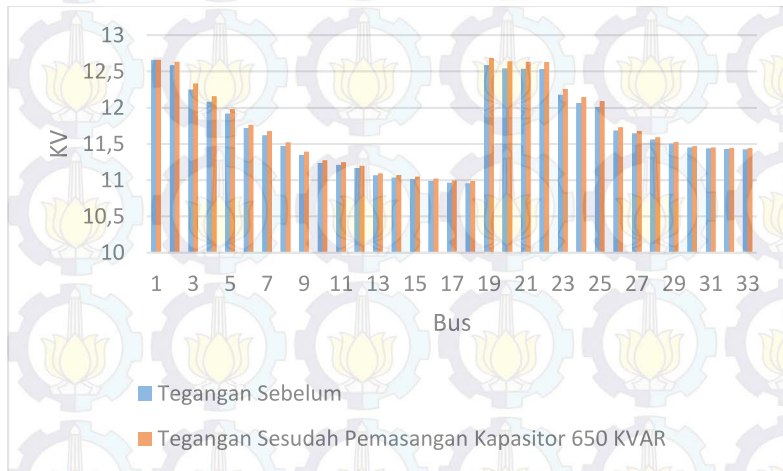
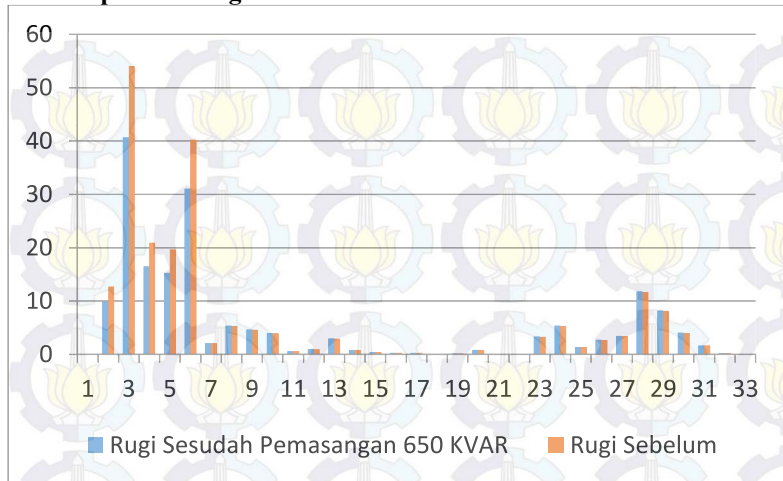
➤ 4 Kapasitor dengan nilai 350 KVAR



➤ 3 Kapasitor dengan nilai 500 KVAR



➤ 2 Kapasitor dengan nilai 650 KVAR



➤ 1 Kapasitor dengan nilai 1150 KVAR

